

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

| Тема работы  |
|--|
| Закономерности формирования, особенности структуры и свойства ударопрочных защитных покрытий системы Si-Al-N |

УДК 621.793:620.18

Студент

| Группа | ФИО    | Подпись | Дата |
|--------|--------|---------|------|
| 154Б62 | У Шаша |         |      |

Руководитель ВКР

| Должность       | ФИО        | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОМ ИШНПТ | Божко И.А. | к.ф.-м.н.              |         |      |

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность        | ФИО        | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОСГН ШБИП | Кашук И.В. | к. т. н.               |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность          | ФИО        | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--------------------|------------|------------------------|---------|------|
| Профессор ООД ШБИП | Сечин А.И. | д. т. н.               |         |      |

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП                                     | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--|--------------|------------------------|---------|------|
| 22.03.01<br>Материаловедение и технологии материалов | Овечкин Б.Б. | к. т. н.               |         |      |

*Планируемые результаты обучения по ООП 22.03.01*

| Код<br>результата | <b>Результат обучения</b><br><br>(выпускник должен быть готов)  |
|-------------------|---|
| P1                | Применять основные положения и методы гуманитарных наук при решении социально-общественных и профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов                          |
| P2                | Использовать современное информационное пространство при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов  |
| P3                | Разрабатывать, оформлять и использовать техническую документацию, включая нормативные документы по вопросам интеллектуальной собственности в области материаловедения и технологии материалов   |
| P4                | Проводить элементарный экономический анализ ресурсов, технологий и производств при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов                            |
| P5                | Эффективно работать в коллективе на основе принципов толерантности, использовать устную и письменную коммуникации на родном и иностранном языках в мультикультурной среде.                      |
| P6                | Эффективно выполнять трудовые функции по реализации высокотехнологичных производств материалов и изделий  |
| P7                | Проводить комплексную диагностику материалов, процессов и изделий с использованием технических средств измерений, испытательного и производственного оборудования                               |
| P8                | Готовность к мотивированному саморазвитию, самоорганизации и обучению для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности в области материаловедения и технологии материалов |
| P9                | Успешно использовать методы и приемы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически, социально и технически безопасное производство  |
| P10               | Использовать принципы производственного менеджмента и управления персоналом в производственной деятельности в области материаловедения и технологии материалов                                  |

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов  
Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата) Овечкин Б.Б.

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

|  |
|--|
| бакалаврской работе  |
| (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации) |

Студенту:

| Группа | ФИО    |
|--------|--------|
| 154Б62 | У Шаша |

Тема работы:

|  |                              |
|--|------------------------------|
| Закономерности формирования, особенности структуры и свойства ударопрочных защитных покрытий системы Si-Al-N |                              |
| Утверждена приказом директора ИШНПТ  | Приказ №59-87/с от 28.02.220 |

|  |               |
|--|---------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 25.05.2020 г. |
|--|---------------|

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

|   |   |
|---|---|
| <b>Исходные данные к работе</b>   | Создание оптически прозрачного защитного покрытия системы Al-Si-N на поверхности монокристаллического кремния, обладающие повышенной стойкостью к ударному воздействию высокоскоростных твердых микрочастиц Fe.   |
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Анализ и систематизация литературных источников по теме исследования;</li> <li>2. Исследование микроструктуры и фазового состава защитных покрытий системы Si-Al-N методами рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии;</li> <li>3. Оценка величины светопропускания образцов с защитными покрытиями системы Si-Al-N в видимом диапазоне длин волн.</li> </ol> |

|  |   |
|--|---|
|  | <p>4. Определение микротвёрдости и трещиностойкости покрытий системы Si-Al-N;</p> <p>5. Исследование стойкости образцов Si с защитными покрытиями на основе Si-Al-N к ударным воздействиям высокоскоростных твердых частиц железа;</p> <p>6. Подготовка материалов для разделов «Социальная ответственность» и «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».</p> |
|--|---|

#### **Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

(с указанием разделов)

| Раздел                     | Консультант                   |
|----------------------------|-------------------------------|
| Финансовый менеджмент.     | Кашук И.В. доцент ОСГН ШБИП   |
| Социальная ответственность | Сечин А.И. профессор ООД ШБИП |

#### **Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке**

введение, литературный обзор, методика эксперимента, результаты и их обсуждение, финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение, социальная ответственность и заключение должны быть написаны на русском языке.

|   |               |
|---|---------------|
| <b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b> | 27.04.2020 г. |
|---|---------------|

#### **Задание выдал руководитель:**

| Должность       | ФИО         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|-------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОМ ИШНПТ | Божко И. А. | к. ф.-м. н.            |         |      |

#### **Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО    | Подпись | Дата |
|--------|--------|---------|------|
| 154Б62 | У Шаша |         |      |

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»  
 Уровень образования бакалавр  
 Отделение школы (НОЦ) материаловедения  
 Период выполнения весенний семестр 2020 учебного года

Форма представления работы:

|  |
|--|
| <b>бакалаврская работа</b>   |
| (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация) |

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

|  |            |
|--|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 25.05.2020 |
|--|------------|

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)           | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|---|------------------------------------|
| 24.04.2020    | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | 15                                 |
| 10.05.2020    | Социальная ответственность                                      | 15                                 |
| 20.05.2020    | Литературный обзор  | 15                                 |
| 23.05.2020    | Методика эксперимента   | 30                                 |
| 25.05.2020    | Результаты и их обсуждение                                      | 25                                 |

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

| Должность       | ФИО         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|-------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОМ ИШНПТ | Божко И. А. | к.ф.-м.н.              |         |      |

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

| Должность        | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|--------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОМ, ИШНПТ | Овечкин Б.Б. | к. т. н.               |         |      |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ  
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

|               |            |
|---------------|------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b> |
| 154Б62        | У Шаша     |

|                     |              |                           |  |
|---------------------|--------------|---------------------------|--|
| <b>Школа</b>        | <b>ИШНПТ</b> | <b>Отделение (НОЦ)</b>    | <b>ОМ</b>  |
| Уровень образования | Бакалавриат  | Направление/специальность | 22.03.02<br>Материаловедение<br>и технологии<br>материалов |

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

|   |  |
|---|--|
| 1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> | Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска<br>Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ |
| 2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>   | Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование   |
| 3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>                                  | Отчисления во внебюджетные фонды 30 %  |

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

|  |   |
|--|---|
| 1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>               | Расчет конкурентоспособности<br>SWOT-анализ   |
| 2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>   | Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования |
| 3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>               | Расчет бюджетной стоимости НИ   |
| 4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i> | Расчет интегрального показателя эффективности   |

**Перечень графического материала**

|   |
|---|
| 1. Оценка конкурентоспособности ИП      |
| 2. Матрица SWOT                         |
| 3. Диаграмма Ганта                      |
| 4. Бюджет НИ                            |
| 5. Основные показатели эффективности НИ |

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|---|--|

**Задание выдал консультант:**

|                     |             |                               |                |             |
|---------------------|-------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b>    | <b>ФИО</b>  | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Доцент ОСГН<br>ШБИП | Кащук И. В. | К.Т.Н                         |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

|               |            |                |             |
|---------------|------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 154Б62        | У Шаша     |                |             |

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

|               |            |
|---------------|------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b> |
| 154Б62        | У Шаша     |

|                     |              |                           |  |
|---------------------|--------------|---------------------------|--|
| <b>Школа</b>        | <b>ИШНПТ</b> | <b>Отделение (НОЦ)</b>    | <b>ОМ</b>  |
| Уровень образования | Бакалавриат  | Направление/специальность | 22.03.02<br>Материаловедение<br>и технологии<br>материалов |

Тема ВКР:

Закономерности формирования, особенности структуры и свойства ударопрочных защитных покрытий системы Al-Si-N

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

|  |   |
|--|---|
| 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения | Объект: нанокompозитные покрытия Al-Si-N<br>Область применения: в аэрокосмической промышленности для защиты оптических элементов космических аппаратов, как окна, линзы, зеркала и т.д. |
|--|---|

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

|   |  |
|---|--|
| <b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul> | Трудовой кодекс Российской Федерации<br>ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ<br>ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ  |
| <b>2. Производственная безопасность:</b>  | 1. Анализ показателей шума. 2. Анализ показателей микроклимата. 3. Анализ освещенности рабочей зоны. 4. Анализ электробезопасности. 5. Анализ пожарной безопасности. |
| <b>3. Экологическая безопасность:</b>   | Анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы).<br>Анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы).<br>Анализ воздействия объекта на литосферу (отходы).        |
| <b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>  | взрыв, сильные морозы зимой  |

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|---|--|

**Задание выдал консультант:**

|                       |            |                               |                |             |
|-----------------------|------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b>      | <b>ФИО</b> | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Профессор ООД<br>ШБИП | Сечин А.И. | Д. Т. Н.                      |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

|               |            |                |             |
|---------------|------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 154Б62        | У Шаша     |                |             |

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: состоит из 86 страниц, 24 рисунков, 28 таблиц, 52 источников.

Ключевые слова: покрытия Al-Si-N, ударопрочность, трещиностойкость.

Объектом исследования является ударопрочные защитные покрытия системы Si-Al-N, которые осаждали на подложку из монокристаллического кремния с кристаллографической ориентацией.

Цель работы — исследование структурно-фазового состояния и физико-механических свойств покрытий Si-Al-N толщиной 3 мкм и 6 мкм, полученных методом импульсного магнетронного напыления на поверхности монокристалла кремния, а также оценка их стойкости к воздействию высокоскоростных твердых микрочастиц железа.

В процессе исследования проводились обзоры литературы, исследование физических и механических свойства покрытия с разной толщиной, а также оценка их стойкости к ударным нагрузкам.

В результате исследования установлено, что защитные покрытия SiAlN обладают мелкокристаллической столбчатой структурой, состоящей преимущественно из фазы AlN (ГПУ), имеют высокий коэффициент светопропускания ( $\geq 80\%$ ) в видимой области спектра. Нанесение покрытий системы Si-Al-N позволяет увеличить микротвердость поверхностного слоя образцов монокристалла кремния до  $24,8 \pm 2,50$  ГПа, а также их трещиностойкость до  $2,3 \pm 0,34$  МПа·м<sup>1/2</sup>. Ударные испытания показали, что нанесение покрытий Al-Si-N на образцы монокристаллического кремния приводит к уменьшению поверхностной плотности кратеров по сравнению с исходными образцами.

Область применения: используется покрытие Al-Si-N на поверхности аэрокосмических аппаратов для защита оптически прозрачных элементов от ударов микрометеороидов в космосе.



## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

КА — космические аппараты;

СБ — солнечные батареи;

Me-X — металл-металлоид;

ОФВДП — осаждение из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы;

АПП — углеродные алмазоподобные покрытия;

ГПУ — гексагональная плотноупакованная кристаллическая решетка

РФА — рентгенофазового анализа;

ПЭМ — просвечивающая электронная микроскопия;

СЭМ — сканирующая электронная микроскопия;

DLC — алмазоподобный углерод.

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| Введение .....   | 12 |
| 1 Создание защитных покрытий для оптических элементов различных конструкций.....   | 14 |
| 2 Объекты и методы исследования.....   | 27 |
| 2.1 Объекты исследования.....  | 27 |
| 2.2 Методика рентгенофазового анализа .....  | 28 |
| 2.3 Методика просвечивающей электронной микроскопии .....  | 29 |
| 2.4 Спектрофотометрический метод .....   | 30 |
| 2.5 Методика оценки параметров механических свойств.....   | 31 |
| 2.6 Ударные испытания .....  | 32 |
| 3 Экспериментальные результаты и их обсуждение .....   | 35 |
| 3.1. Структурно-фазовое состояние нанокompозитных покрытий системы Si-Al-N.....  | 35 |
| 3.2. Оптические и механические свойства защитных покрытий системы Si-Al-N.....   | 43 |
| 3.3. Исследование стойкости нанокompозитных защитных покрытий к ударным нагрузкам .....  | 46 |
| 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....  | 51 |
| 4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения ..... | 51 |
| 4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....   | 51 |
| 4.1.2 SWOT-анализ.....   | 53 |
| 4.2 Планирование научно-исследовательских работ .....  | 55 |
| 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....   | 55 |
| 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ .....  | 56 |
| 4.2.3 Разработка графика проведения исследования .....   | 56 |
| 4.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....  | 59 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.3   | Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования ... | 64 |
| 5     | СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....   | 68 |
| 5.1   | Производственная безопасность .....  | 68 |
| 5.1.1 | Анализ показателей шума.....   | 69 |
| 5.1.2 | Анализ показателей микроклимата .....  | 70 |
| 5.1.3 | Анализ освещенность рабочей зоны .....   | 71 |
| 5.1.4 | Анализ электробезопасности .....   | 75 |
| 5.1.5 | Анализ пожарной безопасности .....   | 76 |
| 5.2   | Экологическая безопасность .....   | 77 |
| 5.3   | Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....  | 78 |
|       | ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 80 |
|       | СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....  | 82 |

## Введение

Одной из наиболее актуальной задач в настоящее время является создание защитных покрытий, обладающих высокой прочностью и необходимой оптической прозрачностью в видимом диапазоне длин волн. Это связано с возможностью широкого их применения в качестве защиты оптических элементов различных конструкций от механических повреждений. Особенно в такой защите нуждаются ракетная и космическая техника, совершающая длительные полеты в условиях открытого космического пространства. Во время вывода на орбиту, а также в период эксплуатации летальный (космический) аппарат (КА) испытывает воздействие различных факторов космического пространства, среди которых горячая магнитосферная плазма, электроны, ионы радиационных поясов Земли, метеоритная пыль или мелкие частицы техногенного происхождения и т.д. Воздействие всех этих факторов космического пространства приводит к деградации свойств различных элементов космического корабля и, следовательно, к снижению ресурса его работы. Одной из важных систем, которые в значительной мере влияют на срок активного существования КА, является система энергообеспечения космического аппарата. Основным элементом системы энергообеспечения КА являются солнечные батареи (СБ). Наиболее опасным из вышеуказанных факторов для солнечных батарей КА является воздействие метеоритной пыли, которая ухудшает оптические свойства поверхности фотоэлектрических преобразователей вследствие эрозии, а также может приводить к нарушению их слоистой структуры. Результатом такого воздействия может являться снижение мощности СБ или поломка системы энергообеспечения КА. В случае выхода из строя системы энергообеспечения может произойти отказ функционирования КА в целом.

Очевидно, что для решения данной проблемы требуется создание специальных способов защиты для фотоэлектрических преобразователей СБ КА, которые будут отвечать следующим требованиям: обеспечивать максимальную энергетическую эффективность и сохранение электрических

характеристик без значительных изменений геометрических размеров и массы конструкции. В этом случае применение сверхпрочных оптически прозрачных защитных покрытий могло бы помочь решить данную проблему. Однако, чтобы судить о способности защитных покрытий сопротивляться разрушающему воздействию высокоскоростных частиц микронного размера требуется проведение предварительных ударных испытаний.

## **1 Создание защитных покрытий для оптических элементов различных конструкций**

Одним из перспективных методов защиты кварцевых элементов оптических систем КА является нанесение на их рабочие поверхности защитных керамических покрытий, характеризующихся высокими значениями твердости. В качестве материалов защитных покрытий наиболее широко применяют тугоплавкие соединения типа металл-металлоид (Me-X), где в качестве металла выступают тугоплавкие металлы IV-VI групп Периодической системы элементов, а в качестве металлоида – углерод, азот, кислород. Для соединений типа Me-X характерна структура фаз внедрения – атомы металлоида занимают междоузлия в кристаллической решетке, образованной атомами металла. Следствием внедрения атомов металлоида в решетку металла является образование сильных химических связей Me-X, значительно изменяющих физико-химические свойства. Однако величина твердости таких покрытий соизмерима с твердостью кварцевого стекла, вследствие чего применение их в качестве защиты оптических элементов КА от механических повреждений, возникающих при высокоскоростных ударах микрометеороидов, неэффективно.

Комбинация двух или более нанокристаллических фаз в составе одного покрытия обеспечивает сложную конфигурацию межзеренных границ, что приводит к повышению микротвердости. Такие покрытия состоят из основной твердой нанокристаллической фазы, на границах зёрен которой располагается тонкий слой второй нанокристаллической или аморфной фазы, препятствующий росту зёрен основной фазы. Другими словами, твердые зёрна первой фазы отделены друг от друга, покрыты тонкой сетью атомов другой фазы, сегрегированных на их поверхностях. На сегодняшний день одним из наиболее удачных примеров такой композиции является система нк-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. На рис. 1.1 приведена зависимость изменения твердости нанокompозитного покрытия нк-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> как функции содержания нитрида кремния [1]. Электронно-микроскопические исследования, проведенные для

разных составов, соответствующих различной твердости материала, показали, что структура покрытий нитрида титана без кремния представляет собой отдельные кристаллиты TiN размером несколько сот нанометров в направлении перпендикулярном плоскости роста и десятки нанометров в плоскости роста (вставка А на рис. 1.1).

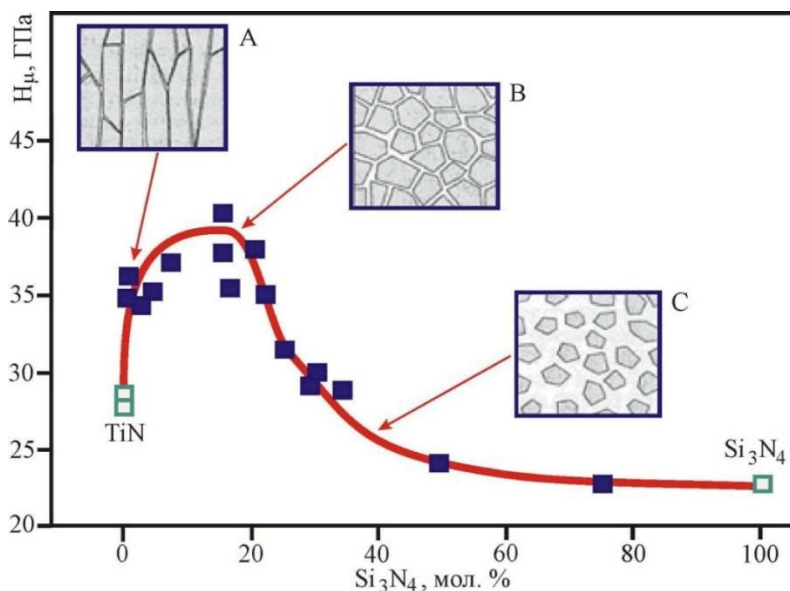


Рисунок 1.1 – Влияние содержания нитрида кремния на твердость материала системы нк-  
TiN/a- $Si_3N_4$  [1]

Введение малого количества нитрида кремния при конденсации приводит к значительному увеличению твердости. При этом даже частичное покрытие зерен нитрида титана нитридом кремния препятствует дальнейшему росту зерен TiN и, таким образом, стимулирует появление новых зародышей фазы TiN при непрерывном процессе напыления. При содержании 15–20 мол. %  $Si_3N_4$  средний размер зерен TiN не превышает 7 нм. Этот размер является слишком малым для активации дислокационных источников, что, в свою очередь, уменьшает пластичность и увеличивает твердость материала. При механической нагрузке такой материал может релаксировать на ее действие лишь путем проскальзывания зерен по границе (т.е. путем движения единичных недеформированных нанокристаллитов TiN один относительно другого). Подобный процесс требует больше энергии, нежели деформация путем движения дислокаций, приводящая к увеличению твердости указанного

материала.

Оценка среднего расстояния между зернами нитрида титана показала, что для достижения максимально высоких механических характеристик нанокристаллиты TiN должны быть разделены лишь несколькими монослоями нитрида кремния (вставка В на рис. 1.1). При большом содержании нитрида кремния среднее расстояние между зернами становится достаточным для возникновения и развития трещин в фазе  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . При этом твердость материала приближается к твердости массивного  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (вставка С на рис. 1.1). Эволюция твердости в нанокompозите с повышенным содержанием аморфной фазы показывает, что для увеличения твердости подобных материалов важными являются два фактора: размер кристаллитов должен быть меньше 10 нм в направлении деформации, чтобы помешать движению дислокаций, а среднее расстояние между зернами не должно превышать 0,5 нм, чтобы препятствовать зарождению и развитию трещин. Идеализированная модель со сверхтвердым нанокompозитным покрытием показана на рис. 1.2.

Исходя из вышеприведенных представлений, Вепрек с соавторами предложили теоретическую концепцию создания твердых нанокристаллических нанокompозитных покрытий системы Ti-Si-N, согласно которой такие покрытия должны состоять из свободных от дислокаций нанокристаллитов (твердых фаз) размером порядка 3–10 нм, разделенных прослойкой аморфной фазы размером 1–3 нм.



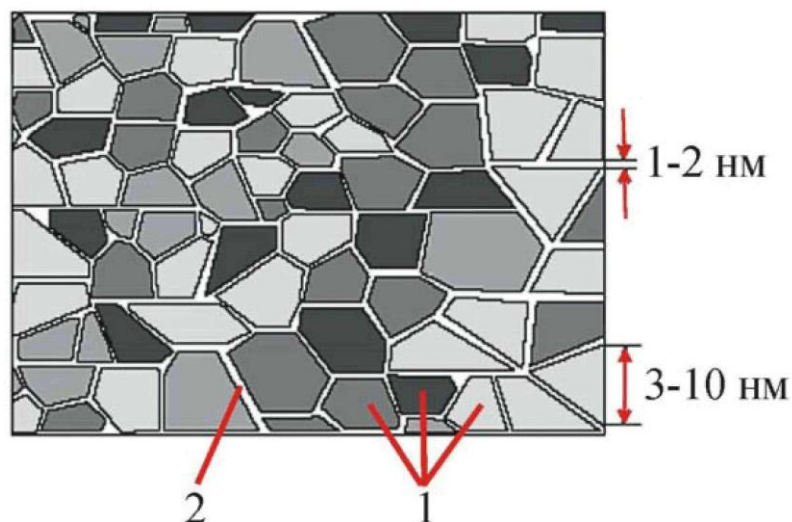


Рисунок 1.2 – Идеализированные модели наноструктурированных покрытий в соответствии с теорией Вепрека и соавторов [2]

На рис. 1.3 представлено схематическое изображение одного из нанокompозитных покрытий на основе Ti, Si и N, полученных Вепреком и др. Нанокompозит состоит из матрицы аморфного нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с включениями нанокристаллитов  $\text{TiN}$  и выделениями  $\text{TiSi}_2$ , на тройных стыках зерен нитрида титана. При этом указанные выделения могут быть как нанокристаллическими, так и аморфными.

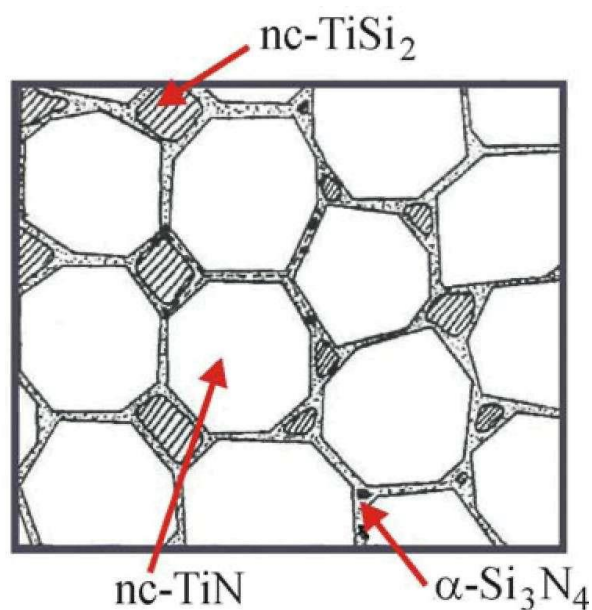


Рисунок 1.3 – Структурная схема нанокompозитов нк-TiN/ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ /нк-TiSi<sub>2</sub> [3]

Формирование таких аморфно-кристаллических композиций согласно концепции, предложенной Вепреком с соавторами, протекает по диффузионно-

контролируемому механизму, подобному спинодальному распаду, когда при определенных условиях термодинамически выгодно расслоение пересыщенного твердого раствора на стабильные фазы (в данном случае стехиометрические фазы TiN и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). Такой распад не связан с преодолением энергетического барьера для создания зародыша, характеризуется возникновением флуктуационных волн концентрации и определяется диффузионными процессами. Для псевдобинарной системы TiN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> в определенной области составов и температур минимуму свободной энергии соответствует структура, в которой аморфная фаза Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> образует непрерывную сетку с характерным пространственным промежутком, содержащим кристаллит TiN. Размер кристаллита задается балансом между уменьшением свободной энергии смеси при фазовом расслоении и энергией деформации межфазной границы. По-видимому, более корректное название этого фазового превращения – термодинамически управляемая модуляция состава [13].

На основе таких нанокомпозитных структур Вепреку с соавторами [4] удалось синтезировать покрытия нового поколения с твердостью 80–105 ГПа. Для сравнения отметим, что до этого момента твердостью около 100 ГПа обладал только природный алмаз. На рис. 1.4 показана зависимость измеренной микротвердости по Виккерсу от приложенной нагрузки для покрытия нк-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/a-TiSi<sub>2</sub> толщиной 6,1 мкм. Видно, что при нагрузке 30 мН измеренная твердость превышает 110 ГПа и уменьшается до 80 ГПа при нагрузке 70 мН. Уменьшение измеренной твердости с увеличением нагрузки происходит из-за увеличения влияния мягкой подложки [5]. Однако, даже при нагрузке 1000 мН покрытия на мягкой стальной подложке по-прежнему не прорываются несмотря на то, что глубина псевдопластической деформации превышает 1 мкм. Даже при высокой нагрузке, где влияние подложки еще больше, твердость по-прежнему удивительно высока и составляет 50 ГПа при нагрузке 500 мН и 45 ГПа при нагрузке 1000 мН. Это типичный пример, который вопреки ожиданиям и утверждениям [6] демонстрирует тот факт, что сверх- и ультратвердые нанокомпозиты могут иметь удивительную устойчивость к

хрупкому разрушению.

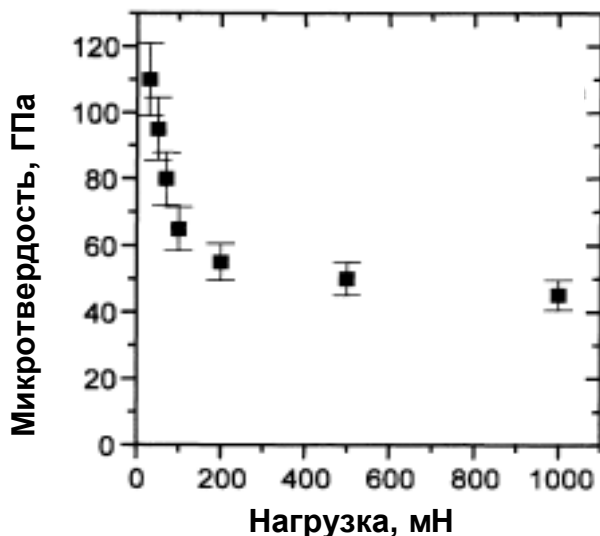


Рисунок 1.4 – Микротвердость по Виккерсу покрытия нк-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/a-TiSi<sub>2</sub> толщиной 6,1 мкм в зависимости от прилагаемой нагрузки [4]

В более ранних работах по нк-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, нк-W<sub>2</sub>N/a-SiN и нк-VN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [ 7 , 8 ] было установлено, что максимальная твердость в этих нанокompозитах получается в том случае, когда содержание Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> достигает порога перколяции в трехмерную сеть и составляет 16-20 мол.%. Для этих покрытий, которые осаждались в условиях относительно «мягкой» ионной бомбардировки, одновременно с максимальной твердостью наблюдается минимальный размер кристаллитов [7, 8]. Поверхность растущей пленки, полученной в аномальном тлеющем разряде постоянного тока, используемого в данной работе, подвергается интенсивной ионной бомбардировке, что инициирует формирование кристаллитов. Таким образом, мы обнаружили, что максимальная твердость для покрытий нк-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> наблюдается при той же концентрации, что и для покрытий, полученных в высокочастотном разряде, а размер кристаллитов монотонно уменьшается с увеличением содержания Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [ 9 ]. Однако, в одной из последних работ Вепрека [4] показано, что максимальная твердость наблюдается в том случае, когда поверхность нанокристаллов TiN покрыта одним монослоем Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (рис. 1.5, а) [19]. Важно отметить, что этот максимум наблюдается как для трехкомпонентных нк-TiN/a-

$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{a-TiSi}_2$  образцов с относительно низким общим содержанием Si (менее 10 ат. %), где наблюдается только аморфный  $\text{TiSi}_2$ , а также и для четырехкомпонентных нк- $\text{TiN}/\text{a-Si}_3\text{N}_4/\text{a-}$  и нк- $\text{TiSi}_2$  образцов с высоким общим содержанием Si (10-23 ат. %, рис. 1.5, б).

Полученный Вепреком результат убедительно демонстрирует, что для получения высокой твердости поверхности покрытий на основе Ti-Si-N нанокристаллы должны быть покрыты приблизительно одним монослоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , то есть система должна проявлять перколяционное поведение  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в нк-TiN и нк- $\text{TiSi}_2$ . Это означает, что подобный ход, используемый в бинарной системе нк-TiN/a- $\text{Si}_3\text{N}_4$ , должен оказывать некоторый стабилизирующий эффект наноструктуры за счет фазовой сегрегации.

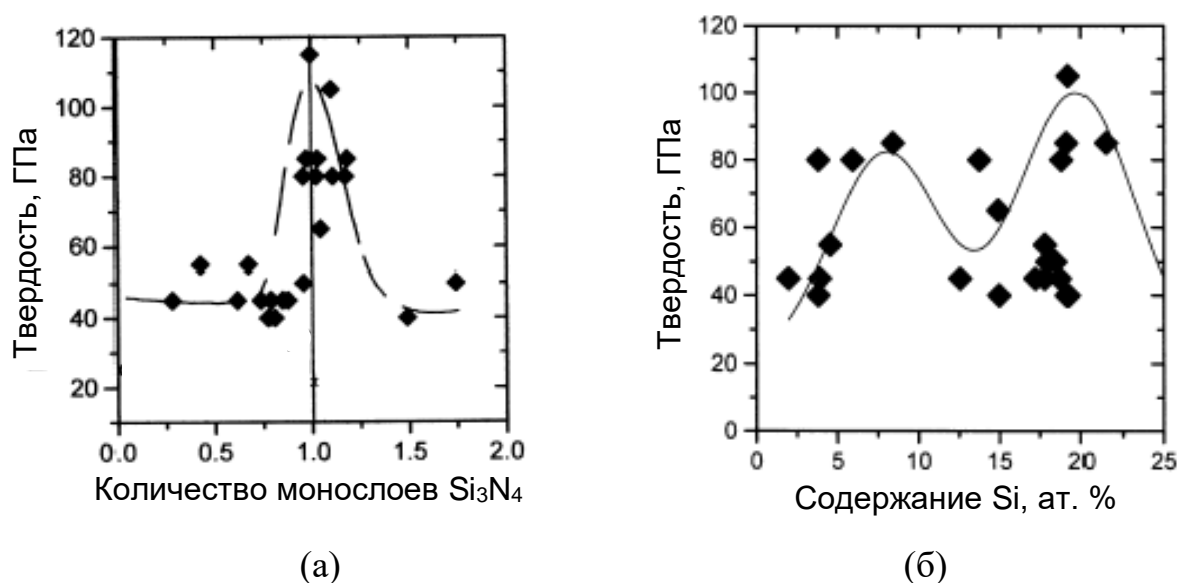


Рисунок 1.5 – Изменение твердости по Виккерсу для покрытий на основе Ti-Si-N в зависимости от величины прослойки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (а) между кристаллитами TiN и содержания кремния (б) в покрытиях

Разница между сверхтвёрдой двухкомпонентной нк-TiN/a- $\text{Si}_3\text{N}_4$  системой с твердостью  $H=40-60$  ГПа и ультратвёрдыми трехкомпонентной и четырехкомпонентной нк-TiN/a- $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{a-}$  и нк- $\text{TiSi}_2$  системами с  $H> 80$  ГПа заключается в более сложной наноструктуре последних. Фактически, эта тенденция сохраняется также для последней системы, потому что

трехкомпонентное нк-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/a-TiSi<sub>2</sub> покрытие достигает твердости около 80 ГПа или чуть больше, тогда как имеющиеся на сегодня данные показывают, что твердость только четырехкомпонентной системы нк-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/a-TiSi<sub>2</sub> и нк-TiSi<sub>2</sub> с кристаллическими выделениями TiSi<sub>2</sub> достигает 100 ГПа и более. Кроме того, для данного состава твердость возрастает с уменьшением размера кристаллитов, что ранее было обнаружено для двухкомпонентной нк-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> системы.

В последнее время пристальное внимание исследователей привлекают алмазоподобные покрытия из-за уникальности их свойств, среди которых следует отметить высокую твердость, износостойкость, химическую устойчивость, прозрачность и др [10]. Это позволяет использовать подобные покрытия в качестве защитных путем напыления их на различные материалы. Причем свойства этих покрытий сильно зависят от метода и параметров процесса их формирования. Высококачественные алмазоподобные покрытия в последнее время чаще всего получают осаждением из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы (ОФВДП) [11, 12, 13].

В работе [14] исследовали алмазоподобные пленки (АПП), полученные осаждением углерода на полированные кремниевые подложки комбинированным методом, сочетающим PVD и CVD и базирующимся на использовании в качестве напылительных систем электромагнитных импульсных плазменных ускорителей, в которых рабочее вещество, предварительно переводимое сначала в паровое, а потом в плазменное состояние, ускоряется в результате использования сильноточного импульсного вакуумно-дугового разряда. Для получения износостойких покрытий использована серийная установка вакуумного напыления УВНИПА-1-001, оборудованная газовым ионным источником ИИ-4-0,15 типа «Радикал», с помощью которого производится очистка и нагрев поверхности подложек; источником плазмы стационарного катодно-дугового разряда с металлическим катодом и источником плазмы импульсного катодно-дугового разряда с катодом из графита. Цилиндрический катод источника углеродной плазмы был

изготовлен из высокочистого графита марки МПГ-6 (99,96 %) плотностью 2,5 г/см<sup>3</sup>. Диаметр катода составлял 30 мм.

АПП получены для трех различных процессов, в которых формирование АПП происходило как за счет поступления углеродной плазмы из импульсного дугового источника, так и путем химического разложения ацетилена, подаваемого в вакуумную камеру. Основное отличие указанных процессов заключалось в динамике подачи ацетилена (времени, давлении, скорости увеличения и понижения давления), а также в количестве разрядных импульсов генератора углеродной плазмы. Осаждение пленки в первом процессе (АПП1) осуществлялось при наиболее резком повышении давления ацетилена (от 10–2 до 1,5 Па) за 2500 импульсных разрядов и дальнейшем осаждении пленки до 5000 импульсов. При этом толщина АПП1 на кремнии составила 1 мкм. Во втором процессе (АПП2) рост давления ацетилена происходил более медленно (до 2,2 Па) под воздействием 3500 импульсов с последующим осаждением при этом давлении на протяжении 10000 импульсов работы углеродного генератора. Толщина АПП2 составила около 4,2 мкм. В третьем процессе (АПП3) давление ацетилена повышалось еще более плавно до 1,7 Па под воздействием 7500 импульсов и затем понижалось до 10–2 Па за 10000 импульсов, затем осуществлялось осаждение алмазоподобного углеродного покрытия только за счет плазмы, генерируемой импульсным генератором. Толщина АПП3 составила около 3,0 мкм.

Измерения микротвердости показали, что средние значения микротвердости АПП, полученных на полированных кремниевых подложках, в первом, втором и третьем процессах соответственно составили 50, 58 и 70 ГПа, а микротвердость кремниевой подложки – 14 ГПа. Повышение микротвердости АПП2 по сравнению с АПП1 обусловлено их различной толщиной (1,0 и 4,2 мкм) и отсутствием влияния более мягкой подложки на результаты измерений. Это связано с тем, что при толщине пленки менее 3 мкм фактически происходит измерение микротвердости композиции пленка – подложка и более мягкая подложка влияет на измеряемое значение микротвердости. АПП3

некоторое время формировалась при промежуточном относительно процессов 1 и 2 давлении ацетилена, но в дальнейшем процесс осаждения осуществлялся только за счет плазмы углерода с бóльшей энергией, что, вероятно, и привело к увеличению ее твердости до 70 ГПа.

В работе [15] с помощью вакуумно-дуговых источников углеродной плазмы, оснащённых магнитными фильтрами, были получены алмазоподобные покрытия, обладающие предельно высокими качествами, приближающимися к свойствам алмаза: плотность достигала  $3,3\text{--}3,4\text{ г/см}^3$ , микротвёрдость – до 180 ГПа, электросопротивление – до  $10^{10}\text{ Ом}\cdot\text{см}$ , концентрация тетраэдрических ( $\text{sp}^3$ ) связей – до 85%, коэффициент трения в воздушной среде и в вакууме составляла  $0,04\text{--}0,1$ .

С целью получения данных об интенсивности разрушения алмазоподобных углеродных покрытий в условиях кавитационного воздействия в жидких средах исследовались последствия микроударных нагрузок в условиях кавитации на поверхность а-С, а-СН и стеллита как наиболее кавитационно- и эрозионностойкого материала. Установлено, что стойкость исследуемых материалов покрытий к кавитационному износу зависит от материала подложки и повышается с увеличением модуля упругости последней. Интенсивность кавитационного износа покрытий тем ниже, чем выше их микротвердость. Стальные образцы с «твёрдыми» (180 ГПа) а-С плёнками показали в несколько раз более высокую стойкость, чем стеллит. Динамика потерь массы DLC покрытий и стеллита демонстрируется графиками на рис. 1.6.

Располагая приведенными данными, можно прогнозировать также защитные качества DLC покрытий в условиях взаимодействия с газопылевыми потоками, поскольку, как показано авторами работы [16], между интенсивностями кавитационно-жидкостной и газопылевой эрозии существует определённая, достаточно жёсткая корреляция.

В связи с тем, что DLC пленки достаточно прозрачны в видимом диапазоне излучения, представляется возможным их применение для защиты и

просветления элементов солнечных батарей на основе аморфного гидрогенизированного кремния.

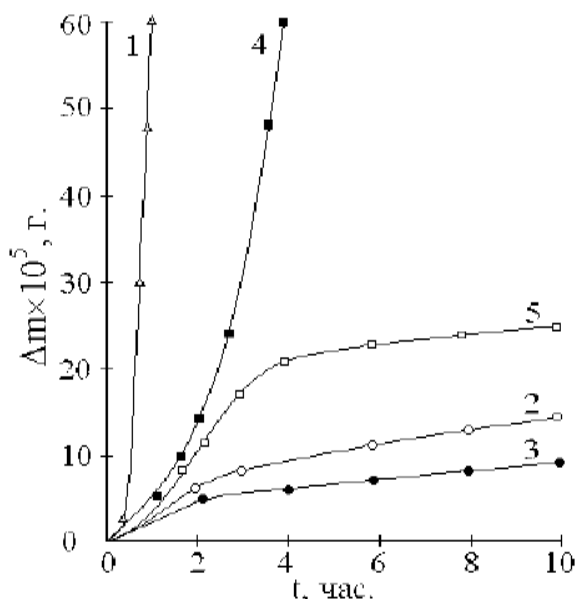


Рисунок 1.6 – Убыль массы покрытия ( $\Delta m$ ) в зависимости от времени

кавитационного воздействия: 1 –  $\alpha$ -C,  $H_{\mu} = 40$  ГПа,  $\rho = 2,4$  г/см<sup>3</sup>; 2 –  $\alpha$ -C,  $H_{\mu} = 100$  ГПа,  $\rho = 3,0$  г/см<sup>3</sup>; 3 –  $\alpha$ -C,  $H_{\mu} = 180$  ГПа,  $\rho = 3,4$  г/см<sup>3</sup>; 4 –  $\alpha$ -C,  $H_{\mu} = 38$  ГПа,  $\rho = 2,4$  г/см<sup>3</sup>; 5 – стеллит

Углеродные алмазоподобные покрытия (АПП), обладающие комплексом ценных физико-механических свойств, находят широкое практическое применение, в том числе в качестве антифрикционных, коррозионностойких, биосовместимых слоев [17, 18]. Вместе с тем, область их использования ограничена из-за низкой термостойкости (на воздухе эксплуатация АПП рекомендуется при температуре не выше 350°C), наличия в слое значительных внутренних механических напряжений, низкой адгезии [17]. Отмечено, что при температуре нагрева выше 400°C в покрытии происходит снижение концентрации  $sp^3$ -связей и соответствующее возрастание числа  $sp^2$ -связей, что приводит к снижению твердости и прочности. Такие температуры могут быть достигнуты в зоне фактического контакта при трении и вызывают интенсивный износ покрытия.

Еще одним интересным вариантом для создания сверхпрочных защитных покрытий являются покрытия на основе системы Si-Al-N, так как эти



покрытия обладают высоким уровнем прозрачности в видимом диапазоне длин волн в сочетании с высокими параметрами механических свойств. На данный момент опубликован ряд работ [19, 20, 21], посвященных формированию методом магнетронного распыления прозрачных нанокompозитных покрытий системы Al-Si-N и изучению их свойств в зависимости от условий получения. В работах Pélisson et. al. [19, 20] проведено исследование эволюции микроструктуры покрытий Al-Si-N при увеличении содержания Si. Показано, что покрытия AlN, не содержащие кремний, имеют ярко выраженную столбчатую микроструктуру, в которой столбцы с преимущественной ориентацией в направлении [002] распространяются по всей толщине покрытия. Ширина, а также их длина по мере увеличения содержания кремния уменьшается. При концентрации Si более 10 ат. % признаки столбчатой структуры отсутствуют, а морфология покрытий демонстрирует нанокристаллическую или аморфную структуру. Все полученные образцы с покрытиями Al-Si-N являются оптически прозрачными в видимой области спектра и абсолютно непрозрачны в УФ области. При этом концентрация кремния на процесс поглощения никакого влияния не оказывает. Результаты измерений нанотвердости показали, что максимум твердости 30 ГПа наблюдается для покрытий Al-Si-N, содержащих 10 ат. % кремния. В работе Liu et. al. [21] с помощью сбалансированного магнетронного распыления были получены оптически прозрачные нанокompозитные покрытия (Al, Si)N с различным содержанием кремния. Показано, что большинство полученных покрытий имеют кристаллическую структуру AlN с изменяющейся преимущественной ориентацией фазы (Al, Si)N между направлениями [110] и [100], что не согласуется с данными работ Pélisson et. al. [19, 20]. Максимум твердости 27,5 ГПа наблюдается для покрытий (Al, Si)N, содержащих 25 ат. % Si и более. При этом полученные покрытия прозрачны в широком диапазоне длин волн от 0,3 до 9 мкм. Следует отметить, что в рассмотренных выше работах [19–21] магнетронные покрытия Al-Si-N характеризуются высокими значениями микротвердости и обладают достаточно высоким коэффициентом

светопропускания в видимой области спектра. Но в то же время данные покрытия имеют сравнительно маленькую толщину (1 и 1,5 мкм), что резко ограничивает область их рационального использования.

До сих пор, покрытия Al-Si-N были исследованы с точки зрения их потенциального применения в устройствах автоэлектронных эмиссионных датчиков, УФ-излучателей света, антиокислительных или оптически прозрачных твёрдых покрытий, стойких к окислению [20]. Нас, прежде всего, интересует возможность использования покрытий системы Al-Si-N в качестве защиты стеклянных элементов любого вида транспорта от механических повреждений, возникающих при ударном воздействии твердых частиц. В этом случае, важную роль помимо высокой твердости и высокой степени прозрачности для световых лучей видимого диапазона играет толщина защитных покрытий. Ранее [22] нами было показано, что увеличение толщины покрытий Si-Al-N от 0,9 мкм до 6,2 мкм позволяет улучшить защитные свойства кварцевого стекла в результате уменьшения в 1,5 раза относительной поверхностной плотности кратеров, формируемых при бомбардировке исследуемых образцов высокоскоростными частицами железа. В данной работе сделана попытка создать защитные покрытия системы Si-Al-N для фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей. Поэтому в качестве подложки было предложено использовать модельный материал – монокристалл кремния. Поскольку функциональные свойства покрытий зависят от их реальной структуры (размера зерна, фазового состава, уровня внутренних напряжений и т.д.), которая может определяться, в том числе природой материала подложки, то целью нашей работы являлось исследование структурно-фазового состояния и физико-механических свойств покрытий Si-Al-N толщиной 3 мкм и 6 мкм, полученных методом импульсного магнетронного напыления на поверхности монокристалла кремния, а также оценка их стойкости к воздействию высокоскоростных твердых микрочастиц железа.

## 2 Объекты и методы исследования

### 2.1 Объекты исследования

Объектом исследования в данной работе выступали защитные покрытия системы Si-Al-N (табл. 2.1), которые осаждали на подложку из монокристаллического кремния с кристаллографической ориентацией [100] методом импульсного магнетронного осаждения на вакуумной установке УВН-05МД «КВАНТ» с частотой 50 кГц, мощность магнетрона составляла 1,2 кВт. Подложка представляла собой диски диаметром 15 мм и толщиной 4,5 мм, изготовленные из монокристаллического кремния марки КДБ-7,5-20 n-типа. Для получения покрытий использовали мозаичную мишень на основе алюминия с кремниевыми вставками, которую распыляли в смеси газов Ar и N<sub>2</sub>. В вакуумной камере общее давление газовой смеси составляло 0,3 Па, парциальное давление азота – 0,075 Па. Используя резистивный молибденовый нагреватель мощностью 10 кВт, предварительно осуществляли нагрев кремниевой подложки в процессе осаждения покрытий системы Si-Al-N до температуры  $280 \pm 10$  °С. Температуру подложки при осаждении покрытий контролировали с помощью хромель-алюмелевой термопары. После осаждения покрытия образцы выдерживали в вакуумной камере в течение 40–60 мин, чтобы снизить его температуру до 90°С. Затем воздух вводили в камеру и выгружали полученные образцы. По данным гравиметрического метода было установлено, что полученные покрытия имеют толщину  $3 \pm 0,5$  мкм и  $6 \pm 0,5$  мкм. Адгезионная прочность полученных покрытий системы Si-Al-N к подложке монокристаллического кремния составляла  $18 \pm 0,5$  Н (при h=3 мкм) и  $25 \pm 0,6$  Н (при h=6 мкм).

Таблица 2.1 – Объекты исследования

| Образец | Подложка   | Температура подложки, °С | Время напыления, мин. | Толщина покрытий, мкм | Адгезионная прочность, Н |
|---------|------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| SiAlN-3 | m-Si [100] | 280±10                   | 66                    | $3 \pm 0,5$           | $18 \pm 0,5$ Н           |
| SiAlN-6 |            |                          | 132                   | $6 \pm 0,5$           | $25 \pm 0,6$ Н           |

## 2.2 Методика рентгенофазового анализа

Изучение фазового состава исследуемых покрытий осуществляли методом рентгеновской дифрактометрии [23] на дифрактометре «ДРОН-7» (Буревестник, Россия). Съемка дифракционного спектра покрытий проводилась при непрерывном  $2\theta$ -сканировании с фокусировкой по Брэггу-Брентано в излучении кобальтового анода (длина волны излучения  $\text{CoK}\alpha$   $\lambda = 1,78897 \text{ \AA}$ ). Съемка велась с полированной поверхности с шагом  $0.05^\circ$ , время экспозиции составляло 10 секунд. Профильный анализ и количественная обработка дифрактограмм были выполнены с использованием программного пакета *Repex*. Для описания профиля линий использовали функцию Лоренца. Интерпретация дифрактограмм проводилась с использованием базы порошковых дифрактометрических данных PDF2 (Powder Diffraction File) картотеки ICDD.

Для оценки параметров тонкой кристаллической структуры исследуемых покрытий проводился анализ профилей дифракционных пиков: по уширению дифракционных линий определяли вклады, связанные с размерами областей когерентного рассеяния ( $D_{\text{ОКР}}$ ) и микронапряжениями  $\epsilon$  (напряжениями второго рода  $\sigma_{\text{II}}$ ). Для определения напряжений второго рода использовали метод Уильямсона-Холла [24], согласно которому:

$$\frac{\beta \cos \theta}{\lambda} = \frac{K}{D_{\text{ОКР}}} + 4\epsilon \frac{\sin \theta}{\lambda} \quad (2.1)$$

где  $\beta$  – величина физического уширения дифракционной линии исследуемого образца,  $\theta$  – брегговский угол,  $K$  – постоянная Шеррера (принимается, что  $K=1$ ),  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения.

Оценку величины физического уширения  $\beta$  осуществляли по формуле:

$$\beta = \beta_{\text{exp}} - \beta_0 \quad (2.2)$$

где  $\beta_{\text{exp}}$  – ширина дифракционных линий на дифрактограмме исследуемого образца (ширина линии на полувысоте дифракционного пика),  $\beta_0$  – величина инструментального уширения. Величина инструментального

уширения дифракционных линий  $\beta_0$  была определена по дифрактограмме эталона.

### 2.3 Методика просвечивающей электронной микроскопии

Для исследования микроструктуры и фазового состава исследуемых защитных покрытий использовали метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [25]. Данный метод заключается в анализе специально приготовленных тонких фольг с помощью проходящего пучка электронов, генерируемого в колонне просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100F (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Данные исследования были проведены на базе центра коллективного пользования «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН. Для проведения исследований методом просвечивающей электронной микроскопии требуется приготовление тонких фольг, состоящее из следующих основных этапов:

1. вырезка заготовок из кремниевой пластины с защитным покрытием (рис. 2.1) в количестве 6 шт. (размер одной заготовки – Д/Ш/В = 0,9 мм/4 мм/1,5 мм);

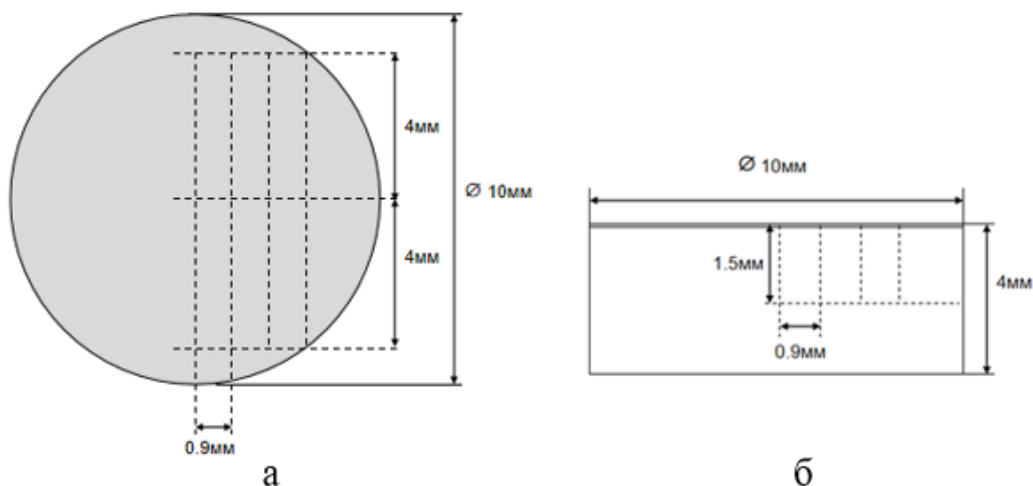


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение вырезки заготовок из исследуемых образцов: а – вид сверху; б – поперечное сечение

2. Шлифование заготовок с целью их утонения, в результате которого три образца имели размеры Д/Ш/В = 0,4 мм/4 мм/0,15 мм (рис. 2.2), другие три

образца – Д/Ш/В = 1,2 мм/4 мм/0,15 мм;

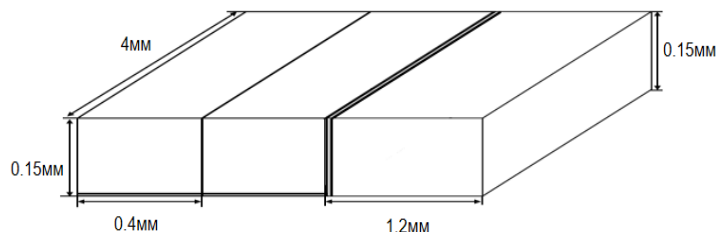


Рисунок 2.2 – Полученные образцы (размер двух образцов - Д/Ш/В = 0,4мм/4мм/0,15мм, одного - Д/Ш/В = 1,2мм/4мм/0,15мм)

3. Ионное утонение заготовок на установке «JEOL Ion Slicer» и финишная подготовка фольги для просвечивающей электронной микроскопии.

Анализ микродифракционных картин, полученных с помощью просвечивающего электронного микроскопа, осуществлялся путем измерения диаметров присутствующих кольцевых рефлексов. Межплоскостное расстояние рассчитывали по формуле:

$$d_{hkl} = 2\lambda L / D, \quad (2.3)$$

где  $D$  – диаметр кольцевого рефлекса (расстояние центрального рефлекса до других рефлексов),  $\lambda L$  – дифракционная постоянная электронного микроскопа ( $\lambda$  – длина волны электронов,  $L$  – дифракционная длина камеры),  $d_{hkl}$  – межплоскостное расстояние семейства плоскостей  $hkl$ .

Для определения среднего размера зерен на фотографию микроструктуры было нанесено не менее 10 секущих линий и подсчитано число пересечений секущих с границами зерен. Средний условный размер кристаллитов ( $d_{cp}$ ) определяется по формуле (2.4):

$$d_{cp} = L/N, \quad (2.4)$$

где  $L$  – суммарная длина всех отрезков;  $N$  – общее число пересечений секущих с границами зерен.

## 2.4 Спектрофотометрический метод

Анализ оптических свойств покрытий основывался на измерениях

коэффициента пропускания  $T = f(\lambda)$  в диапазоне длин волн света  $\lambda = 200\text{--}800$  нм. При этом спектральное разрешение по длинам волн обычно составляло 1 нм, а точность по абсолютному пропусканию 0,1 %.

Измерения спектров светопропускания исследуемых образцов выполнены при комнатной температуре на двухлучевом спектрофотометре СФ-256 УВИ (ЛОМО Фотоника, Россия). В основу работы данного спектрофотометра положен принцип измерения соотношения двух световых потоков, прошедших сквозь исследуемый образец и сквозь контрольный образец соответственно. В качестве контрольного образца был использован образец стекла марки К8. Зондирующее излучение направлялось перпендикулярно образцу.

## **2.5 Методика оценки параметров механических свойств**

Для оценки механических свойств образцов монокристаллического кремния с защитными покрытиями Si-Al-N определяли микротвердость и трещиностойкость исследуемых образцов, используя метод микроиндентирования [ 26 , 27 ] их поверхности стандартной алмазной пирамидой Виккерса на микротвердомере DM8 (фирмы Affri, Италия). Отпечатки наносили при нагрузках 1–5 Н. Величина нагрузки выбиралась таким образом, чтобы на поверхности исследуемых образцов возникали радиальные трещины, исходящие из вершин отпечатка (рис. 2.3). С целью получения достоверного результата для каждого образца при данной нагрузке наносили не менее 10 отпечатков и за окончательный результат принималось среднее арифметическое значение.

Микротвердость исследуемых образцов рассчитывали по формуле:

$$H_v = 1,854 \frac{F}{d^2}, \quad (2.5)$$

где  $H_v$  – микротвердость по Виккерсу,  $F$  – нагрузка на индентор,  $d$  – средняя длина диагонали формируемого отпечатка.

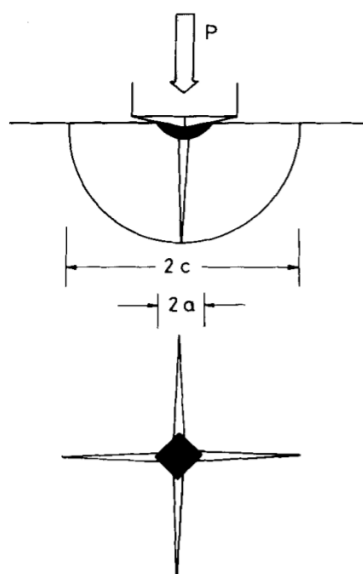


Рисунок 2.3 – Отпечаток от индентора с трещинами,  $a$  – полуширина отпечатка,  $c$  – половина длины трещины, измеренная от центра отпечатка.

В качестве меры трещиностойкости покрытий использовали критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{IC}$ , рассчитанный по формуле [28]:

$$K_{IC} = \alpha \cdot \left( \frac{E}{H_V} \right)^{1/2} \cdot \frac{P}{c^{3/2}}, \quad (2.6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от формы индентора (для пирамидки Виккерса  $\alpha = 0,016$ )  $E$  – модуль упругости,  $H_V$  – твердость по Виккерсу,  $P$  – нагрузка,  $c$  – длина радиальной трещины от центра отпечатка.

## 2.6 Ударные испытания

Для оценки способности образцов кремния с защитными покрытиями на основе Zr-Y-O противостоять ударному воздействию при бомбардировки их высокоскоростными твердыми частицами была использована легкогазовая пушка МПХ23/8 (рисунок 2.4) [29], разработанная в научно-исследовательском институте прикладной математики и механики Томского государственного университета [30]. Пушка состоит из вакуумной камеры, цилиндра и устройства для ускорения поршня. В вакуумной камере находится стол-держатель для исследуемых образцов, в центре которого имеется отверстие диаметром 50 мм



для отсекаания более крупных осколков, которые могут образовываться при разрушении лепестков диафрагмы. На предметном столе-держателе размещались исследуемые образцы в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.5. Для ударных испытаний на столе-держателе закрепляли экспериментальные образцы диаметром 15 мм в количестве 8 штук, которые располагались равномерно вдоль окружности диаметром 115 мм. При этом 4 образца представляли собой исходный кремний (без покрытия), а другие 4 образца – образцы кремния с защитным покрытием на основе Si-Al-N, расположенные в чередующемся порядке.



Рисунок 2.4 – Общий вид легкогазовой пушки МПХ23/8

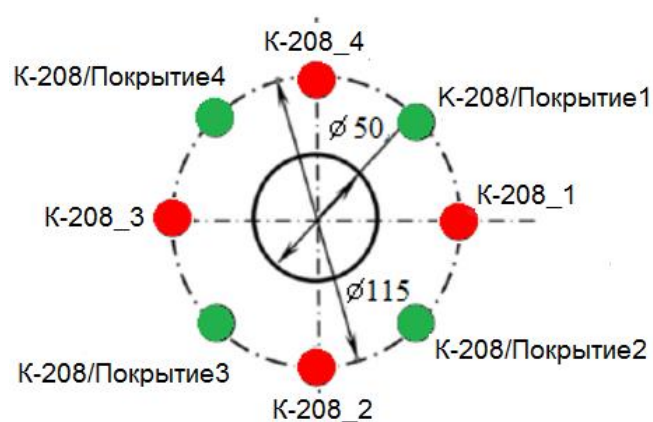


Рисунок 2.5 – Схема расположения образцов на столе-держателе

Для моделирования процесса воздействия микрометеороидов на поверхность космического корабля в лабораторных условиях использовались сферические микрочастицы Fe со средним диаметром  $56 \pm 8,2$  мкм, как показано на рис. 2.6. Одна порция порошка Fe, используемая для каждого выстрела, имела массу  $60,0 \pm 0,1$  мг. Скорость бомбардировки частиц железа в ходе испытаний составляла от 5–7 км/с. Подробное описание методики определения скорости бомбардируемых частиц железа представлено в работе [31].

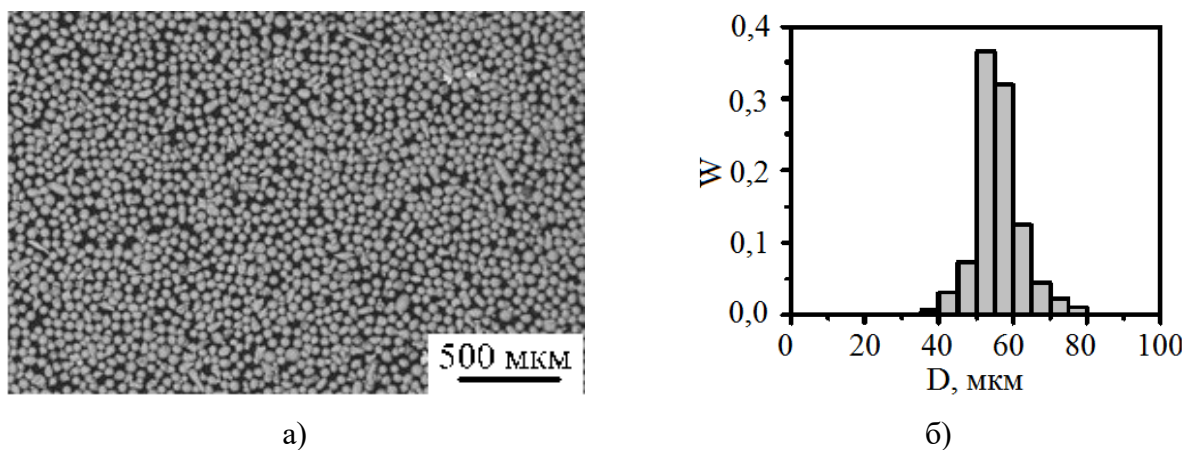


Рисунок 2.6 – РЭМ-изображение частиц порошка железа (а) и распределение частиц порошка Fe (б) по размерам

После проведения ударных испытаний, регистрировали изображения кратеров, сформированных на поверхности исследуемых образцов с помощью растрового электронного микроскопа LEO EVO-50XVP (Carl Zeiss, Германия), размещенного в ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН. Затем по СЭМ-изображениям измерялись диаметры и количество кратеров, сформированных на выбранном участке площадью 80 мм<sup>2</sup>, и затем строились графики, иллюстрирующие распределения кратеров по размерам.

Для оценки способности защитных покрытий противостоять ударному воздействию твердых микрочастиц Fe рассчитывали относительную поверхностную плотность кратеров по формуле:

$$\rho_{\text{отн}} = \frac{\rho_0}{\rho}, \quad (2.7)$$

где  $\rho$  – поверхностная плотность кратеров на кремниях с покрытиями;  
 $\rho_0$  – поверхностная плотность кратеров на исходных кремниях (без покрытия).

## **4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

В современное время, когда ученые проводят научные исследования, им необходимо учитывать не только масштаб открытия, но и коммерческую ценность разработки. Оценка коммерческой ценности разработки считается важным условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Целью данной ВКР является разработка технологии получения методом импульсного магнетронного осаждения композиционных защитных покрытий систем Al- Si-N толщиной от 3 до 6 мкм на поверхности монокристаллического кремния и оценка их стойкости к ударным нагрузкам.

### **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

#### **4.1.1 Анализ конкурентных технических решений**

В условиях постоянного развития рынка необходимо систематически анализировать конкурирующие разработки, которые существуют на рынке. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее дальнейшего совершенствования.

Технология производства пленок достаточно дорогая, что доступна не всем, зато это может компенсироваться тем, что при магнетронном распылении

возможно получить хорошие адгезионные показатели покрытий, а также их твердость. Потребителями данной технологией могут быть: различные оптико-механические заводы, исследовательские предприятия, а также частные заказчики.

В процесс исследования рассматривались две конкурирующие разработки:

1. ионно-лучевое покрытие ( $k_1$ );
2. катодное распыле ( $k_2$ ).

Для проведения данного анализа составлена оценочная карта, приведённая в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

| Критерии оценки                                    | Вес критерия $B_i$ | Баллы    |          |          | Конкурентоспос |          |          |
|--|--------------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|
|  |                    | $B_\Phi$ | $B_{k1}$ | $B_{k2}$ | $K_\Phi$       | $K_{k1}$ | $K_{k2}$ |
| 1  | 2                  | 3        | 4        | 5        | 6              | 7        | 8        |
| Технические критерии оценки ресурсоэффективности   |                    |          |          |          |                |          |          |
| 1. Повышение производительности труда пользователя | 0,2                | 4        | 4        | 3        | 0,8            | 0,8      | 0,6      |
| 2. Простота технологии нанесения покрытия          | 0,15               | 4        | 4        | 3        | 0,6            | 0,6      | 0,45     |
| 3. Энергоэкономичность                             | 0,05               | 4        | 3        | 2        | 0,2            | 0,15     | 0,1      |
| 4.Надежность                                       | 0,15               | 5        | 4        | 4        | 0,75           | 0,6      | 0,6      |
| 5. Экологичность технологии и материала            | 0,1                | 5        | 3        | 3        | 0,5            | 0,3      | 0,3      |
| 6. Широта области применения покрытия              | 0,15               | 4        | 4        | 3        | 0,6            | 0,6      | 0,45     |
| Экономические критерии оценки эффективности        |                    |          |          |          |                |          |          |
| 1. Стоимость покрытия                              | 0,15               | 3        | 3        | 3        | 0,45           | 0,45     | 0,45     |
| 2. Финансирование научной разработки               | 0,05               | 4        | 4        | 4        | 0,2            | 0,2      | 0,2      |
| Итого  | 1                  | 33       | 29       | 25       | 4,1            | 3,7      | 3,1      |

где  $\Phi$  – магнетронном распылении покрытия, позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $V_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таким образом, данная научно-исследовательская разработка является конкурентоспособной.

#### 4.1.2 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта проведен SWOT-анализ, где детально продуманы сильные и слабые стороны научно-технической разработки.

Второй этап заключается в определении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. На данном этапе необходимо построить интерактивную матрицу проекта, чтобы лучше разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Используя знак «+», чтобы указать сильное соответствие сильных сторон возможностям, знак «-» означает слабое соответствие, если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-», то «0». Соотношения параметров представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Интерактивная матрица проекта

| Сильные стороны проекта |       |        |        |        |       |
|-------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Возможности проекта     |       | $C_1$  | $C_2$  | $C_3$  | $C_4$ |
|                         | $B_1$ | -      | -      | -      | -     |
|                         | $B_2$ | +      | +      | -      | +     |
|                         | $B_3$ | -      | -      | -      | -     |
| Угрозы проекта          | $Y_1$ | -      | -      | -      | +     |
|                         | $Y_2$ | -      | -      | -      | -     |
| Слабые стороны проекта  |       |        |        |        |       |
| Возможности проекта     |       | $Сл_1$ | $Сл_2$ | $Сл_3$ |       |
|                         | $B_1$ | -      | +      | -      |       |
|                         | $B_2$ | -      | -      | -      |       |
|                         | $B_3$ | -      | -      | -      |       |
| Угрозы проекта          | $Y_1$ |        | +      | -      |       |
|                         | $Y_2$ | -      | -      | -      |       |

Результаты выполнения SWOT-анализа представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 — Результаты SWOT-анализ

|   |   |  |
|---|---|--|
|   | <b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b><br>С <sub>1</sub> . Высокая производительность<br>С <sub>2</sub> . Высокая скорость осаждения распыления,<br>С <sub>3</sub> . Снижение температуры осаждения<br>С <sub>4</sub> . Увеличение срока службы деталей и механизмов                                     | <b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b><br>Сл <sub>1</sub> . Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров<br>Сл <sub>2</sub> . Вероятность получения брака<br>Сл <sub>3</sub> . Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемых при проведении научного исследования |
| <b>Возможности:</b><br>В <sub>1</sub> . Использование инновационной инфраструктуры ТПУ (т. е. использование научного оборудования)<br>В <sub>2</sub> . Возможность внедрения технологии в производство<br>В <sub>3</sub> . Так как группа имеет знания и опыт в данном направлении, то если возможность получать покрытия для других деталей и механизмов | С <sub>1</sub> В <sub>2</sub> , С <sub>4</sub> В <sub>2</sub> – позволяют при наличии спроса быстро нарастить объемы производства— позволяют при наличии спроса быстро нарастить объемы производства<br>С <sub>2</sub> В <sub>2</sub> - улучшение технологии в производство за счет изменения параметров и режимов покрытия | Сл <sub>2</sub> В <sub>1</sub> . оборудование, позволит на ранних стадиях исследование, выявить и предотвратить появление брака  |
| <b>Угрозы:</b><br>У <sub>1</sub> . Вероятность появления более выгодных предложений на рынке, так как в данном направлении ведется большое количество исследований.<br>У <sub>2</sub> . Разработка новых технологий конкурентами и снижение цен   | С <sub>4</sub> У <sub>1</sub> . возможность изменения параметров и режимов покрытия, что позволит создавать новые и более качественные конкурентноспособные изделия.  | Сл <sub>2</sub> У <sub>1</sub> . Введение систем совершенствования производственных процессов для снижения брака   |

Основные преимущества данного проекта - высокая производительность и возможность создания оптимальных условий формирования покрытий с улучшенными характеристиками, увеличение срока службы детали и механизма. Для слабых сторон проекта необходимо приложить усилия, введение систем совершенствования производственных процессов для

снижения брака.

## **4.2 Планирование научно-исследовательских работ**

### **4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования**

Планирование комплекса предполагаемых работ в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научного исследования.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления. Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ.

В таблице 4.4 приведены порядки производимых задач и работ, а также распределение исполнителей по данным работам.

Таблица 4.4 — Список производимых задач и работ и их исполнители

| №  | Содержание работ   | Должность исполнителя |
|----|--|-----------------------|
| 1  | Составление и утверждение технического задания                           | Руководитель          |
| 2  | Подбор и изучение материалов по теме                                     | Инженер               |
| 3  | Подготовка установки к работе  | Руководитель          |
| 4  | Подготовка подложек  | Инженер               |
| 5  | Подбор режимов нанесения покрытий  | Руководитель, инженер |
| 6  | Получение покрытий   | Инженер               |
| 7  | Исследование закономерности формирования, особенности структуры покрытий | Инженер               |
| 8  | Исследование физических свойств покрытий                                 | Инженер               |
| 9  | Исследования механических свойств покрытий                               | Инженер               |
| 10 | Составление пояснительной записки  | Инженер               |

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, потому что он зависит от трудно учитываемых параметров. Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости  $t_{ожи}$  рассчитывается по следующей формуле:

$$t_{ожи} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4.2)$$

Где  $t_{\min i}$  — минимально возможное время выполнения задачи (оптимистичная оценка: самых благоприятных обстоятельствах), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  — максимально возможное время выполнения задачи (пессимистичная оценка: самых неблагоприятных обстоятельствах), чел.-дн.

Определить продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , в соответствии с расчетом сложности ожидаемой работы:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожи}}{q_i}, \quad (4.3)$$

Где  $t_{ожи}$  — ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;  $q_i$  — количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

#### 4.2.3 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Ганта — горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. В связи с этим



необходимо воспользоваться формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.4)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.5)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году ( $T_{\text{кал}} = 365$ );

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году ( $T_{\text{вд}} = 104$ );

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году ( $T_{\text{пд}} = 14$ ).

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  необходимо округлить до целого числа. Все полученные результаты представлены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Временные показатели проектирования

| Название работы  | Трудоёмкость работ   |         |                      |         |                           |         | Длительность работ в Рабочих днях $T_{pi}$ | Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$ |
|--|----------------------|---------|----------------------|---------|---------------------------|---------|--|--|
|  | $t_{\min}$ , чел-дни |         | $t_{\max}$ , чел-дни |         | $t_{\text{ож}}$ , чел-дни |         |  |  |
|  | Руководитель         | Инженер | Руководитель         | Инженер | Руководитель              | Инженер |  |  |
| 1  | 2                    | 3       | 4                    | 5       | 6                         | 7       | 8  | 9  |
| 1. Составление и утверждение технического задания                  | 2                    | -       | 5                    | -       | 3,2                       | -       | 3,2  | 4,7  |
| 2. Подбор и изучение материалов по теме                            | -                    | 4       | -                    | 7       | -                         | 5.2     | 5,2  | 7,7  |
| 3. Подготовка установки к работе                                   | 2                    | -       | 3                    | -       | 2,4                       | -       | 2,4  | 3,6  |
| 4. Подготовка подложек   | -                    | 3       | -                    | 5       | -                         | 3,8     | 3,8  | 5,6  |
| 5. Подбор режимов нанесения покрытий                               | 2                    | 2       | 4                    | 4       | 2,8                       | 2,8     | 1,4  | 2,1  |
| 6. Получение покрытий  | -                    | 5       | -                    | 7       | -                         | 5,8     | 5,8  | 8,6  |
| 7. Исследование закономерности формирования, особенности структуры | -                    | 14      | -                    | 21      | -                         | 16,8    | 16,8                                       | 24,9   |

|   |   |    |    |    |     |     |      |       |
|---|---|----|----|----|-----|-----|------|-------|
| покрытий                                      |   |    |    |    |     |     |      |       |
| 8. Исследование физических свойств покрытий   | - | 7  | -  | 14 | -   | 9,8 | 9,8  | 14,5  |
| 9. Исследования механических свойств покрытий | - | 7  | -  | 14 | -   | 9,8 | 9,8  | 14,5  |
| 10. Составление пояснительной записки         | - | 10 | -  | 20 | -   | 14  | 14   | 20,7  |
| Итого   | 6 | 52 | 12 | 92 | 8,4 | 68  | 72,2 | 106,9 |

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Диаграмма Ганта

| Название работы   | Исполнитель             | $T_{ki}$<br>кал.<br>дн. | Продолжительность работ |   |   |      |   |   |        |   |   |     |   |   |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---|---|------|---|---|--------|---|---|-----|---|---|
|   |                         |                         | Февраль                 |   |   | Март |   |   | Апрель |   |   | Май |   |   |
|   |                         |                         | 1                       | 2 | 3 | 1    | 2 | 3 | 1      | 2 | 3 | 1   | 2 | 3 |
| 1. Составление и утверждение технического задания                           | Руководитель            | 4,7                     | ■                       |   |   |      |   |   |        |   |   |     |   |   |
| 2. Подбор и изучение материалов по теме                                     | Инженер                 | 7,7                     | ■                       | ■ |   |      |   |   |        |   |   |     |   |   |
| 3. Подготовка установки к работе  | Руководитель            | 3,6                     |                         | ■ |   |      |   |   |        |   |   |     |   |   |
| 4. Подготовка подложек  | Инженер                 | 5,6                     |                         | ■ |   |      |   |   |        |   |   |     |   |   |
| 5. Подбор режимов нанесения покрытий  | Руководитель<br>Инженер | 2,1                     |                         | ■ | ■ |      |   |   |        |   |   |     |   |   |
| 6. Получение покрытий   | Инженер                 | 8,6                     |                         |   | ■ |      |   |   |        |   |   |     |   |   |
| 7. Исследование закономерности формирования, особенности структуры покрытий | Инженер                 | 24,9                    |                         |   |   | ■    | ■ | ■ |        |   |   |     |   |   |
| 8. Исследование физических свойств покрытий                                 | Инженер                 | 14,5                    |                         |   |   |      |   |   | ■      | ■ | ■ |     |   |   |
| 9. Исследования механических свойств покрытий                               | Инженер                 | 14,5                    |                         |   |   |      |   |   |        | ■ | ■ | ■   |   |   |
| 10. Составление пояснительной записки                                       | Инженер                 | 20,7                    |                         |   |   |      |   |   |        |   |   | ■   | ■ | ■ |

Где ■ – научный руководитель; ■ – инженер.

#### 4.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов. Для формирования бюджета научного исследования необходимо представить затраты по статьям расходов:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

##### 4.2.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. Результаты показаны в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Сырье и материалы

| №               | Наименование                  | Количество | Цена за единицу, руб. | Сумма, руб. |
|-----------------|-------------------------------|------------|-----------------------|-------------|
| 1               | Баллон Ar, 99.999%            | 10 л       | 100                   | 1000        |
| 2               | Баллон N <sub>2</sub> 99.999% | 10 л       | 30                    | 300         |
| 3               | Кремний                       | 2 шт.      | 520                   | 1040        |
| 4               | Наждачная бумага              | 5 шт.      | 45                    | 225         |
| Итого по статье |                               |            |                       | 2565        |

##### 4.2.4.2 Специальное оборудование для научных работ

При приобретении специальное оборудование необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в

калькуляции в виде амортизационных отчислений. Расчет затрат по данной статье заносится в табл. 4.8.

Таблица 4.8 – Специальное оборудование для экспериментальных работ

| № п/п | Наименование оборудования                 | Цена единицы оборудования, руб. | Кол-во ед. | Срок полезного использования, лет | Время использования, мес. | $H_A$ , % | Амортизация, руб. |
|-------|---|---------------------------------|------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------|-------------------|
| 1     | 2   | 3                               | 4          | 5                                 | 6                         | 7         | 8                 |
| 1     | Вакуумная установка УВН-05МД «КВАНТ»      | 1300000                         | 1          | 15                                | 0,3                       | 0,07      | 2275              |
| 2     | Дифрактометр ДРОН-7 (Буревестник, Россия) | 1400000                         | 1          | 15                                | 0,27                      | 0,07      | 2205              |
| 3     | Нанотвердомер «NanoTest 600»              | 250000                          | 1          | 10                                | 0,16                      | 0,1       | 333,3             |
| Итого |   | 4813,3                          |            |                                   |                           |           |                   |

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.6)$$

где  $n$  – срок полезного использования.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m, \quad (4.7)$$

где  $I$  – итоговая сумма, руб.;  $m$  – время использования.

#### 4.2.4.3 Основная заработная плата

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и

дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (4.8)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{\text{осн}}$ ).

Основная заработная плата  $Z_{\text{осн}}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (4.9)$$

Где  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (4.10)$$

где  $Z_m$  – должностной оклад работника за месяц;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб. дн.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 28 раб. дня –  $M=11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней –  $M=10,3$  месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Таблица 4.9 – Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени                  | Руководитель | Студент |
|--|--------------|---------|
| Календарное число дней                       | 365          | 365     |
| Количество нерабочих дней:                   | 52/14        | 104/14  |
| - выходные дни                               |              |         |
| - праздничные дни                            |              |         |
| Потери рабочего времени:                     | 48/5         | 24/10   |
| - отпуск                                     |              |         |
| - невыходы по болезни                        |              |         |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 246          | 213     |

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.}$$

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{о}}} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.}$$

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (4.11)$$

Где  $Z_{\text{тс}}$  - заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  - премиальный коэффициент, равен 0,3;  $k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

– для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Расчет основной заработной платы

| Исполнители  | $Z_{\text{тс}}, \text{руб}$ | $k_{\text{пр}}$ | $k_{\text{д}}$ | $k_{\text{р}}$ | $Z_{\text{м}}, \text{руб}$ | $Z_{\text{дн}}, \text{руб}$ | $T_{\text{р}}, \text{раб.дн.}$ | $Z_{\text{осн}}, \text{руб}$ |
|--------------|-----------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Руководитель | 26300                       | 0,3             | 0,2            | 1,3            | 51285                      | 2147,3                      | 7                              | 15031,1                      |
| Инженер      | 17000                       | 0,3             | 0,2            | 1,3            | 33150                      | 1743,1                      | 67                             | 116787,7                     |
| Итого:       |                             |                 |                |                |                            |                             |                                | 131818,8                     |

#### 4.2.4.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 15% от основной заработной платы, работников, участвующих в выполнении работы. Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (4.12)$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы.

для руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 15031,1 = 2254,7 \text{ руб.}$$

для инженера:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 116787,7 = 17518,2 \text{ руб.}$$

#### 4.2.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (4.13)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ):

Для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (15031,1 + 2254,7) = 5185,7 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (116787,7 + 17518,2) = 40291,8 \text{ руб.}$$

#### 4.2.4.6 Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, например: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$\begin{aligned} З_{накл} &= (\text{сумма статей} 1 \div 5) \cdot k_{пр} \\ &= (2565 + 4813,3 + 131818,8 + 19772,9 + 45477,5) \cdot 0,2 = 40889,5 \text{ руб.} \end{aligned}$$

где  $k_{пр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

#### 4.2.4.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет НИ (Закономерности формирования, особенности структуры и свойств ударопрочных защитных покрытий системы Si-Al-N) по форме, приведенной в таблице 4.11. В качестве аналогов данной НТР рассмотрены:

1. ионно-лучевое покрытие (Аналог 1);
2. катодное распыление (Аналог 2).

Таблица 4.11 - Расчет бюджета затрат НТИ.

| Наименование статьи  | Сумма, руб.    |          |          |
|--|----------------|----------|----------|
|  | Текущий проект | Аналог 1 | Аналог 2 |
| 1. Материальные затраты НТИ  | 2565           | 2565     | 3052     |
| 2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ | 4813,3         | 5006     | 5188     |
| 3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы                    | 131818,8       | 131818,8 | 131818,8 |
| 4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы              | 19772,9        | 19772,9  | 19772,9  |
| 5. Отчисления во внебюджетные фонды  | 45477,5        | 45477,5  | 45477,5  |
| 6. Накладные расходы   | 40889,5        | 40928    | 41061,8  |
| 7. Итого бюджетная стоимость   | 245337         | 245568,2 | 246371   |

#### 4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} , \quad (4.14)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-



исследовательского проекта.

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Таблица 4.12. Расчет Интегрального финансового показателя.

| № исполнения      | Стоимость исполнения | Максимальная стоимость исполнения | Интегральный финансовый показатель |
|-------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1. Текущий проект | 245337               | 246371                            | 0,996                              |
| 2. Аналог 1       | 245568.2             |                                   | 0,997                              |
| 3. Аналог 2       | 246371               |                                   | 1                                  |

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.15)$$

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;  $a_i$  – весовой коэффициент проекта;  $b_i$  – балльная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (таблица 4.13).

Таблица 4.13 – Сравнительная оценка характеристик проекта

| Критерии  | Весовой коэффициент | Текущий проект | Аналог 1 | Аналог 2 |
|---|---------------------|----------------|----------|----------|
| 1. Безопасность процессов получения покрытия            | 0,2                 | 4              | 4        | 4        |
| 2. Обеспечение высокой равномерности осаждения покрытия | 0,3                 | 5              | 4        | 3        |
| 3. Малое потребление ресурсов при осаждении покрытия    | 0,3                 | 4              | 4        | 4        |

|  |     |     |     |     |
|--|-----|-----|-----|-----|
| 4. Высокая скорость осаднения покрытия | 0,2 | 5   | 5   | 3   |
| Итого:                                 | 1   | 4,5 | 4,2 | 3,5 |

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p-m.n} = 0,2 \times 4 + 0,3 \times 5 + 0,3 \times 4 + 0,2 \times 5 = 4,5$$

$$I_{p-a1} = 0,2 \times 4 + 0,3 \times 4 + 0,3 \times 4 + 0,2 \times 5 = 4,2$$

$$I_{p-a2} = 0,2 \times 4 + 0,3 \times 3 + 0,3 \times 4 + 0,2 \times 3 = 3,5$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.исп.1}}, \quad (4.16)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (таблица 4.17). Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{cp}$ ):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}, \quad (4.17)$$

Таблица 4.14 – Сравнительная эффективность разработки

| № п/п | Показатели  | Текущий проект | Аналог 1 | Аналог 2 |
|-------|---|----------------|----------|----------|
| 1     | Интегральный финансовый показатель разработки           | 0,996          | 0,997    | 1        |
| 2     | Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки | 4,5            | 4,2      | 3,5      |
| 3     | Интегральный показатель эффективности                   | 4,52           | 4,21     | 3,5      |
| 4     | Сравнительная эффективность вариантов исполнения        | 1              | 0,9      | 0,8      |

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и

ресурсоэффективным является текущий проект, т. к. показатель его сравнительной эффективности по отношению к каждому из сравниваемых вариантов больше 1.

### **Вывод к разделу**

В данном разделе ВКР проведено планирование научно-исследовательской работы и оценка сметы затрат на проведение исследования. Можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации устройства, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;

2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 74 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 67 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель – 7 дней;

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 245337 руб.;

4. По факту оценки эффективности ИР можно сделать выводы:

1) Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,995, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;

2) Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,5, по сравнению с 4,2 и 3,5;

3) Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,52, по сравнению с 4,21 и 3,5, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

## **5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

В данной исследовании рассматриваются фазовые состава, микроструктуры, а также физико-механические свойства ударопрочных защитных покрытий системы Si-Al-N, полученных методом реактивного магнетронного распыления.

Целью данного раздела является разработка и анализ вопросов производственной, экологической безопасности, а также безопасности в чрезвычайных ситуациях в лаборатории Томского политехнического университета при выполнении основных этапов нанесения покрытий и их последующих исследований.

### **5.1 Производственная безопасность**

Рабочее место располагается на подвальном этаже в аудитории 020, 10 корпуса ТПУ на проспекте Ленина. Помещение представляет собой комнату размером 11 м на 9,5 м, высотой 4,2 м, 2 окна, в помещении находится электроимпульсное плазменное спекание на установке SPS-515S, верстаки и стеллажи, низкоскоростная пила IsoMet, ультразвуковой ванны, установки шлифования и 4 рабочего стол.

Лабораторные исследования проводят в двух положениях: стоя и сидя. В связи с этим, организуя рабочее место исследователя, необходимо соблюдать требования ГОСТ 12.2.032-78 [32] и ГОСТ 12.2.033-78 [33]. При проведении исследования были выявлены потенциальные вредные и опасные производственные факторы [ 34 ], которые могут воздействовать на исследователя во время изучения свойств покрытий на основе Al-Si-N (таблица 5.1).

Таблица 5.1 Возможные опасные и вредные факторы

| Факторы<br>(ГОСТ 12.0.003-2015)     | Этапы работ    |                  |                  | Нормативные<br>документы   |
|-------------------------------------|----------------|------------------|------------------|--|
|                                     | Разраб<br>отка | Изгото<br>вление | Эксплу<br>атация |  |
| 1. Анализ показателей шума          |                | +                |                  | ГОСТ 12.1.003-2014 [35]<br>ГОСТ 12.1.029-80 [36]<br>СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [37] |
| 2. Анализ показателей микроклимата  | +              | +                | +                | СанПиН 2.2.4.548-96 [38]<br>ГОСТ 12.1.005-88 [39]<br>ГН 2.2.5.3532-18 [40]     |
| 3. Анализ освещенности рабочей зоны | +              | +                |                  | СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [41]<br>СП 52.13330.2016 [42]                       |
| 4. Анализ электробезопасности       | +              | +                | +                | ГОСТ 12.1.019-2017 [43]<br>ГОСТ 12.1.038-82 [44]                               |
| 5. Анализ пожарной безопасности     | +              | +                | +                | СП 12.13130.2009 [45]  |

### 5.1.1 Анализ показателей шума

Последствиями влияния шума могут стать снижение работоспособности, повышенная утомляемость и головная боль. Допустимые уровни шума на рабочем месте, обозначенные в ГОСТ 12.1.003-2014 [35] и в СанПиН 2.2.4.548-96 [38], представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряженности в дБА.

| Категория<br>напряженности<br>трудового процесса | Категория тяжести трудового процесса |                                   |                                 |                                 |                                     |
|--|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
|  | Легкая<br>физическая<br>нагрузка     | Средняя<br>физическая<br>нагрузка | Тяжелый<br>труд<br>1<br>степени | Тяжелый<br>труд<br>2<br>степени | Тяжелы<br>й<br>труд<br>3<br>степени |
| Напряженность легкой степени                     | 80                                   | 80                                | 75                              | 75                              | 75                                  |
| Напряженность средней степени                    | 70                                   | 70                                | 65                              | 65                              | 65                                  |
| Напряженный труд 1 степени                       | 60                                   | 60                                | -                               | -                               | -                                   |
| Напряженный труд 2 степени                       | 50                                   | 50                                | -                               | -                               | -                                   |

Работа специалиста по материаловедению в лаборатории относится к категории работ с легкой степенью напряженности и с легкой физической нагрузкой. Для рабочих мест таких работников предельно допустимый уровень шума составляет 80 дБА. Источником шума в лаборатории является ультразвуковая ванна. Для снижения шума при работе ультразвуковой ванны, можно принимать защитные средства органов слуха наушники или применяется номенклатура шумопоглощающих боксов [36].

### **5.1.2 Анализ показателей микроклимата**

Показателями, характеризующими микроклимат, являются: 1) температура воздуха; 2) относительная влажность воздуха; 3) скорость движения воздуха; 4) запыленности. Эти показатели микроклимата должны обеспечивать поддержание оптимального или приемлемого уровня теплового состояния организма человека.

Оптимальные и относительные показатели микроклимата в рабочей зоне производственного помещения по ГОСТ 12.1.005-88 [39] приведены в таблице 5.3.

Соответствие показателей микроклимата требуемым оптимальным и допустимым нормам необходимо регулярно проверять с помощью измерений показателей микроклимата по требованиям, представленным в СанПиН 2.2.4.548-96 [38]. Чтобы улучшить микроклимат, необходимо выполняться комплексы санитарно-гигиенических, мероприятий:

- контроль качества работы оборудования;
- применение качественных аспирационных систем (вентиляции);
- соблюдение правил работы с вредными веществами;
- регулярная уборка помещений и т.д. [46].

Таблица 5.3 Требования к микроклимату помещения для категории работ «Легкая Ia»

| Период<br>года | Температура, °С         |                         |                                |                      |                                | Относительная<br>влажность, % |   | Скорость движения,<br>м/с    |  |
|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|------------------------------|--|
|                | Оптим<br>ал<br><br>ьная | допустимая              |                                |                      |                                | опти<br>маль<br>ная           | допустима<br>я на<br>рабочих<br>местах<br>постоянны<br>х и<br>непостоян<br>ных, не<br>более | оптималь<br>ная, не<br>более | допустима<br>я на<br>рабочих<br>местах<br>постоянн<br>ых и<br>непостоян<br>ных |
|                |                         | верхняя<br>граница      |                                | нижняя<br>граница    |                                |                               |   |                              |  |
|                |                         | на рабочих местах       |                                |                      |                                |                               |   |                              |  |
|                |                         | посто<br>-<br>янны<br>х | не-<br>посто<br>-<br>янны<br>х | пос-<br>тоян<br>-ных | не-<br>посто<br>-<br>янны<br>х |                               |   |                              |  |
| Холодн<br>ый   | 22-24                   | 25                      | 26                             | 21                   | 18                             | 40-<br>60                     | 75  | 0,1                          | Не более<br>0,1  |
| Теплый         | 23-25                   | 28                      | 30                             | 22                   | 20                             | 40-<br>60                     | 55<br>(при 28°С)  | 0,1                          | 0,1-0,2  |

### 5.1.3 Анализ освещенность рабочей зоны

Освещение на рабочем месте должно соответствовать условиям работы. Нормы освещения научно-технических лабораторий, в том числе физических, стилометрических, спектрографических и т. п., по СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [41] представлены в таблице 5.4. Работа по исследованию свойств нанокomпонентных покрытий относится к зрительным работам средней точности (IV<sub>г</sub> разряд). Нормы разных видов освещения для промышленных помещений со зрительными работами четвертого разряда [41] представлены в таблице 5.5.

Оптимальные параметры освещения способствуют повышению эффективности работы и оказывают положительное влияние на психическое состояние человека. Результатом недостатка освещенности являются усталость и сухость глаз, ухудшение сна и утомляемость организма.

Таблица 5.4 Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения научно-технических лабораторий

| Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности (Г – горизонтальная, В – вертикальная) и высота плоскости над полом, м | Естественное освещение КЕО $e_n$ , %      |                       | Совмещенное освещение КЕО $e_n$ , %       |                       | Искусственное освещение       |                     |                                     |   |        |
|--|---|-----------------------|---|-----------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---|--------|
|  | при верхнем или комбинированном освещении | при боковом освещении | при верхнем или комбинированном освещении | при боковом освещении | Освещенность, лк              |                     | Показатель дискомфорта, М, не более | Коэффициент пульсации освещенности, КЕО $e_n$ , %, не более |        |
|  |   |                       |   |                       | при комбинированном освещении | при общем освещении |                                     |   |        |
|  |   |                       |   |                       |                               |                     |                                     |   | все го |
| Г-0,8  | 3,5                                       | 1,2                   | 2,1                                       | 0,7                   | 500                           | 300                 | 400                                 | 40  | 10     |

Таблица 5.5 Требования к освещению помещений промышленных предприятий (для категории IV<sub>г</sub>)

| Искусственное освещение                |                       |                              |   |                 |
|--|-----------------------|------------------------------|---|-----------------|
| Освещенность, лк                       |                       |                              | Сочетание нормируемых величин объединенного показателя дискомфорта UGR и коэффициента пульсации |                 |
| при системе комбинированного освещения |                       | при системе общего освещения | UGR, не более   | Кп, %, не более |
| Всего                                  | В том числе от общего |                              |   |                 |
| —                                      | —                     | 200                          | 25  | 20              |

Для правильного освещения рабочего места необходимо выбрать вид освещения, количество и расположение ламп, тип осветительных приборов. В лаборатории используются люминесцентные лампы. Специальное оборудование для лабораторных исследований (микроскоп) снабжено встроенной системой освещения.



### Расчет освещенности помещения

Расчет освещенности помещения методом коэффициента светового потока. Длина помещения  $A = 11$  м; ширина  $B = 9,5$  м; высота  $H = 4,2$  м и высота рабочей поверхности  $h_p = 1,2$  м. Коэффициент отражения стен  $\rho_c = 10$  %, потолка  $\rho_n = 30$  %; коэффициент запаса  $k = 1,5$ , коэффициент неравномерности  $Z = 1,1$ . Выбираем светильники типа ОД с длиной  $1,23$  м, критерий оптимальности расположения светильников ( $\lambda$ ) составляет  $1,4$ , мощность  $2 \times 40$  Вт.

Расстояние светильников от перекрытия  $h_c = 0,5$  м. Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 4,2 - 1,2 - 0,5 = 2,5 \text{ м}$$

Расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,5 = 3,5 \text{ м}$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$L / 3 = 3,5 / 3 = 1,17 \text{ м}$$

Количество рядов светильников и количество светильников в ряду:

$$n_{\text{рад}} = \frac{(B - \frac{2}{3}L)}{L} + 1 = \frac{(9,5 - \frac{2}{3} \cdot 3,5)}{3,5} + 1 \approx 3$$

$$n_{\text{св}} = \frac{(A - \frac{2}{3}L)}{l_{\text{св}} + 0,5} = \frac{(11 - \frac{2}{3} \cdot 3,5)}{1,23 + 0,5} \approx 5$$

Общее число светильников:

$$N = n_{\text{рад}} \cdot n_{\text{св}} = 3 \cdot 5 = 15$$

Размещаем светильники в три ряда, в каждом ряду 5 светильников, разрывы между светильниками в ряду составят 25-50 см. Изображаем в масштабе план помещения и размещения на нем светильников (рисунок 5.1).

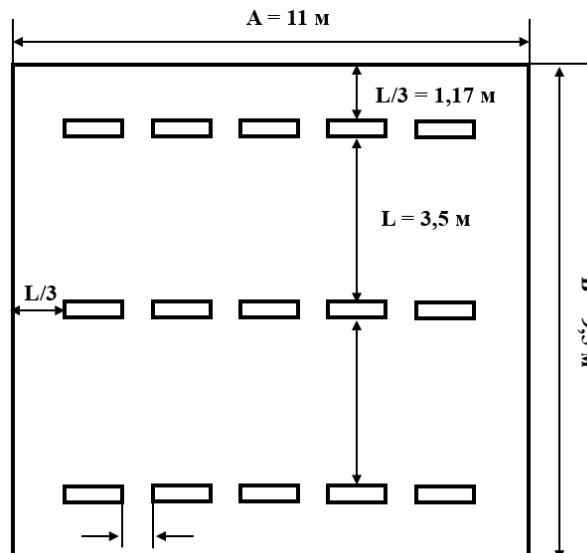


Рисунок 5.1 План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{11 \cdot 9,5}{2,5 \cdot (11 + 9,5)} = 2,04$$

Коэффициент использования светового потока:  $\eta = 0,567$ . Потребный световой поток одной люминесцентной лампы светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{n \cdot N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 11 \cdot 9,5 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,567 \cdot 15 \cdot 2} = 3041 \text{ Лм}$$

Выбираем стандартную лампу – ЛТБ 40 Вт с потоком 2850 лм. Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л. станд.}} - \Phi_{\text{л. расч.}}}{\Phi_{\text{л. станд.}}} \cdot 100\% \leq +20\%$$

$$\frac{\Phi_{\text{л. станд.}} - \Phi_{\text{л. расч.}}}{\Phi_{\text{л. станд.}}} \cdot 100\% = \frac{2850 - 3041}{2850} \cdot 100\% = -6,7\%$$

Таким образом,  $-10\% \leq -6,7\% \leq +20\%$  – необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

### 5.1.4 Анализ электробезопасности

Под электробезопасностью подразумевается комплекс мероприятий, а также технические и организационные средства, обеспечивающие защиту людей от воздействия электрического тока. В таблице 5,6 представлены категория помещения по опасности поражения электрическим током [47].

Таблица 5.6 Категория помещения по опасности поражения электрическим током

| Категория помещения               | Признаки и факторы в помещении (наличие в них одного из следующих условий)  |
|-----------------------------------|---|
| Особо опасные помещения           | а. постоянно 100 % влажность;<br>б. наличие химически активной среды;<br>в. наличие более 2 факторов помещения повышенной опасности                     |
| Помещения с повышенной опасностью | а. повышенная температура воздуха (+ 35 °С);<br>б. повышенная влажность (> 75 %);<br>в. наличие токопроводящей пыли;<br>г. наличие токопроводящих полов |
| Мало опасные помещения            | отсутствуют признаки и факторы, характерные для двух предыдущих классов   |

Лаборатория, в которой проводилось исследование, находится в подвальном помещении. В таких помещения есть опасность повышенного уровня влажности, поэтому относится к помещению повышенной опасности.

Электрический ток приводит к:

- негативным термическим реакциям (ожоги, функциональное расстройство органов в результате их нагрева);
- электролитическим реакциям (разложение органических жидкостей);
- механическим реакциям (расслоение, разрыв тканей организма);
- биологическим реакциям (непроизвольные сокращения мышц, приводящие к нарушению деятельности органов дыхания и кровообращения).

Электробезопасность обеспечивается следующими мерами:

- изоляция рабочего места;
- заземление;

- указатели напряжения;
- защитные очки и др. [43].

### 5.1.5 Анализ пожарной безопасности

Наиболее распространенная вероятная чрезвычайная ситуация в лаборатории – это пожар. Категория помещений по пожаровзрывоопасности в зависимости от характеристики веществ и материалов, находящихся в помещении [45], показано в таблице 5.7.

Таблица 5.7 Категория помещения по пожаровзрывоопасности

| Категория помещения                    | Характеристика веществ и материалов, находящихся в помещении   |
|--|--|
| А<br>Повышенная<br>взрывопожароопасная | Горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки не более 28°C в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные парогазовоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа.<br>Вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом в таком количестве, что расчетное избыточное давление взрыва в помещении превышает 5 кПа. |
| Б<br>Взрывопожароопасная               | Горючие пыли или волокна, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки более 28°C, горючие жидкости в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа.  |
| В1 – В4<br>пожароопасные               | Горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б.<br>Классификация помещений на категории В1 - В4 регламентируется положениями свода правил СП 12.13130.2009 [45].                             |

Помещение лаборатории относится по классификации к помещениям повышенной опасности поражения электрическим током, т. к. в нем присутствует выделение пыли и волокон во взвешенном состоянии [48].

Во избежание пожара в лаборатории необходимо обеспечить правильный тепловой и электрический режим работы оборудования; все сотрудники лаборатории должны пройти противопожарный инструктаж.

Пожарный инвентарь и первичные средства пожаротушения необходимо содержать в исправном состоянии на видном месте в легкой доступности. Если в лаборатории возник пожар, то после ликвидации пожара формируют комиссию, определяющую возможность дальнейшего использования лабораторного оборудования, которое проверяют на соответствие требованиям пожарной безопасности. При отсутствии повреждений возможно продолжение работ [49].

## **5.2 Экологическая безопасность**

В данной работе один из вероятных вредных факторов для атмосферы в ходе приготовления образцов из кремния с покрытием на основе Al-Si-N – распространение порошка в воздушной среде. Защита атмосферного воздуха от выбросов состоит из очистки вредных выбросов в специальных аппаратах (циклоны, фильтры и т. п.) и рассеивания очищенных выбросов в воздухе. Выбросы порошка при проведении исследования не превышают ПДК [50].

В ходе проведения исследования образуются твердые отходы: образец и шкурка, и при использовании установки пила, в процессе работы которой с целью понижения температуры прибора применяется вода, при этом вредные вещества (осколок металла) могут попадать в воду и в почву и менять их состава, что негативно влияет на находящиеся там живые организмы. Избыточное количество вредных веществ в воде опасно для людей, животных и растений. Количество отходов, попадающих во время исследования в воду, не превышает ПДК [51].

Чтобы обеспечить экологической безопасности окружающей среды по требованию [52], использованы установки для улавливания аэрозолей и пыли предусмотрена в системе вентиляции, специальные емкости для складирования металлических отходов, а также емкости для мусора. Все металлические отходы транспортируются в металлургический цех, где они перерабатываются, а весь мусор вывозится за территорию предприятия в специально отведенные места и уничтожается.

### 5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайными ситуациями называются такие ситуации, которые нарушают безопасность жизнедеятельности. Различают два вида основных причин возникновения чрезвычайных ситуаций:

1) внутренние – сложность технологий, недостаточная квалификация персонала или несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место;

2) внешние – неожиданное прекращение подачи электроэнергии, стихийные бедствия. В данном случае, в связи с тем, что в городе Томске с континентально-циклоническим климатом, поэтому возможные чрезвычайные ситуация могут быть сильные морозы зимой. Из-за достижения критически низких температур может привести к авариям в системах отопления и жизнеобеспечения, приостановке работы.

Поэтому в рабочей зоне должны быть установлены отопление, вентиляция или кондиционер. Если трубопровод замерзает, необходимо предусмотреть запасные обогреватели. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

В лаборатории наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций техногенного характера. На случай возникновения чрезвычайной ситуации должен быть предусмотрен следующий мероприятий:

- технические мероприятия: при устройстве электропроводов и оборудования, вентиляции, отоплении, освещении и правильном размещении оборудования необходимо соблюдать правила и норм противопожарных.

- эксплуатационные мероприятия: своевременно предотвращать, ремонтировать и проверять техническое оборудование.

- организационные мероприятия: обеспечить правильную эксплуатацию машин, правильное содержание территории, противопожарный инструктаж и наличие плана эвакуации.

### **Заключение по разделу**

Таким образом, в данном разделе выпускной квалификационной работы рассмотрены основные вопросы социальной ответственности при проведении исследования по изучению ударопрочных защитных покрытий системы Si-Al-N.

Для обеспечения безопасной жизнедеятельности трудового коллектива в лаборатории были разработаны и приняты следующие меры:

1) работа в лаборатории относится к категории работ с легкой степенью напряженности и с легкой физической нагрузкой, для снижения шума при работе, применяются защитные средства органов слуха наушники или номенклатура шумопоглощающих боксов;

2) для улучшения микроклимата применяются качественные вентиляция и регулярно уборка помещений;

3) работа по исследованию свойств нанокomпонентных покрытий относится к зрительным работам средней точности (IV<sub>г</sub> разряд), для правильного освещения рабочего места, используются светильники типа ОД, специальное оборудование снабжено встроенной системой освещения;

4) по опасности поражения электрическим током лаборатория относится к помещению повышенной опасности, электробезопасность обеспечивается следующими мерами: изоляция рабочего места, заземление и указание напряжения;

5) помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к классу В2. Во избежание пожара обеспечение правильного теплового и электрического режима работы оборудования, участок обеспечивается средствами тушения;

6) чтобы обеспечить экологической безопасности, используется установки для улавливания аэрозолей и пыли предусмотрена в системе вентиляции, специальные емкости для складирования отходов и мусора.

7) чтобы обеспечить безопасность в чрезвычайных ситуациях, используется отопление, кондиционер и обогреватели, исследователи должны соблюдают правила и норм лаборатории.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований структурно-фазового состояния и физико-механических свойств покрытий системы Si-Al-N, сформированных на поверхности монокристаллического кремния методом импульсного магнетронного осаждения были установлены следующие закономерности:

1. По данным РФА и ПЭМ установлено, что формируемые в условиях импульсного магнетронного осаждения защитные покрытия SiAlN-3 и SiAlN-6 обладают мелкокристаллической столбчатой структурой, состоящей преимущественно из фазы AlN (ГПУ). При этом формируемые столбцы расположены перпендикулярно кремниевой подложке и простираются в направлении роста защитных покрытий по всей их толщине. По данным ПЭМ также установлено, что средний поперечный размер кристаллитов для покрытий системы Si-Al-N составляет  $25 \pm 5$  нм.

2. Исследование оптических свойств показало, что все полученные покрытия SiAlN-3 и SiAlN-6 имеют высокий коэффициент светопропускания ( $\sim 80\%$ ) в видимой области спектра.

3. При исследовании механических свойств обнаружено, что нанесение покрытий системы Si-Al-N позволяет увеличить микротвердость поверхностного слоя образцов монокристалла кремния до  $24,8 \pm 2,50$  ГПа, а также их трещиностойкость до  $2,3 \pm 0,34$  МПа·м<sup>1/2</sup>.

4. Ударные испытания показали, что нанесение покрытий Al-Si-N толщиной 3 мкм на образцы монокристаллического кремния приводит к уменьшению поверхностной плотности кратеров в 2,4 раза по сравнению с исходными образцами (без покрытия). Это происходит за счет того, что защитные покрытия системы Al-Si-N предотвращают образование на поверхности исследуемых образцов кратеров с размерами менее 30 мкм. В случае покрытий Si-Al-N толщиной 6 мкм также наблюдается уменьшение общего количества кратеров на поверхности исследуемых образцов, но поверхностная плотность кратеров в этом случае уменьшается лишь только в 1,3 раза.



В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» определена перспективность научных исследований и оценки коммерческого потенциала, был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, оценка затраты на реализацию проекта и экономической эффективности исследования.

В разделе «Социальная ответственность» определены уровни безопасности лаборатории и существующие опасные и вредные факторы. Для обеспечения безопасной жизнедеятельности трудового коллектива в лаборатории были разработаны и приняты превентивные меры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Patschaider J. Nanocomposite Hard Coatings for Wear Protections // MRS Bull. – 2003. – Vol. 28(3). – P. 180-183.
2. Veprek S. Reiprich S. A concept for the design of novel superhard coatings // Thin Solid Films. – 1995. – Vol. 268. – P. 64-71.
3. Левашов Е.А. Многофункциональные наноструктурированные пленки / Е.А. Левашов, Д.В. Штанский // Успехи химии. – 2007. – Т. 76. – № 5. – С. 502-509.
4. Veprek S., Niederhofer U. A., Motta K., et. al. Composition, nanostructure and origin of the ultrahardness in nc-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/a- and nc-TiSi<sub>2</sub> nanocomposites with HV= 80 to ≥105 GPa // Surface and Coatings Technology. – 2000. – V. 133-134. – P. 152-159.
5. Veprek S., Vac J. // Sci. Technol. – 1999. – A 17. – P. 2401.
6. Misina M., Musil J., Kadlec S. Composite TiN–Ni thin films deposited by reactive magnetron sputter ion-plating. // Surface and Coatings Technology. – 1998. – V. 110. – P. 168.
7. Veprek S., Reiprich S. A concept for the design of novel superhard coatings // Thin Solid Films. 1995. – V. 268. – № 1–2. – P. 64-71.
8. Veprek S., Haussmann M., Reiprich S. et. al. Novel thermodynamically stable and oxidation resistant superhard coating materials // Surface and Coatings Technology. – 1996. – V. 86–87 – P. 1. – P. 394-401.
9. Veprek S., Nesladek P., Niederhofer A. Recent progress in the superhard nanocrystalline composites: towards their industrialization and understanding of the origin of the superhardness. // Surface and Coatings Technology. – 1998. – V. 108-109. – P. 138-147.
10. Grill A., Meyerson B.S. In: Synthetic Diamond: Emerging CVD Science and Technology / Ed. by De Karl E. Spear, John P. Dismukes. John Wiley and Sons Inc. N.Y. – 1994. – P. 91.

11. Aksenov I.I., Strel'nitskij V.E. Properties of diamond-like coatings prepared by vacuum arc deposition // Surf. Coat. Technol. – 1991. – Vol. 47. – P. 98-105.
12. Hakovirta M., Tiainen V.-M., Pekko P. Techniques for filtering graphite macroparticles in the cathodic vacuum arc deposition of tetrahedral amorphous carbon films // Diamond and Related Materials. – 1999. – Vol. 8. – P. 1183-1192.
13. Takikawa H., Izumi K., Miyano R., Sakakibara T. DLC thin film preparation by cathodic arc deposition with a super droplet-free system // Surf. Coat. Technol. – 2003. – Vol. 163-164. – P. 368-373.
14. Кузнецова Т.А., Худолей А.Л., Акулич В.В. Наноструктурирование алмазоподобных пленок // VIII Международный семинар «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии», 8–10 октября 2008 г., Минск, Беларусь. – 2008. – С. 56-63.
15. Аксенов И.И., Стрельницкий В.Е. Вакуумно-дуговой синтез алмазоподобного углерода // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2002. – №3. – С.110-118.
16. Картмазов Г.Н. и др. Исследование эрозии покрытий из нитрида титана под воздействием кавитации и воздушно-абразивного потока // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1998. – №5. – С. 71–74.
17. Рогачев А.В., Сидорский С.С. Восстановление и повышение износостойкости деталей машин. – Гомель: БелГУТ, 2005. – 343 с.
18. Kennedy F.E., et al. Tribological behavior of hard carbon coatings on steel substrates // Wear: Elsevier Science. – 2003. – Vol. 255. – P. 854– 858.
19. A. Pélisson, M. Parlinska-Wojtan, H.J. Hug, et. al., Surface & Coatings Technology, 202 884–889 (2007).
20. A. Pélisson-Schecker, H.J. Hug, J. Patscheider, Surface & Coatings Technology, 257 114–120 (2014).

21. H. Liu, W. Tang, D. Hui, et. al., Thin Solid Films, 517 5988–5993 (2009).
22. I.A. Bozhko, E. V.Rybalko, M.V.Fedorischeva, et. al., AIP Conference Proceedings, 1683 020028-1 - 020028-4 (2015).
23. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: Металлургия, 1994.
24. Williamson G. Hall W.X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram // Acta Metallurgica – 1953. – Т. 1 – № 1 – С.22–31.
- 25 . Томас Г., Гориндж М.Дж. // Просвечивающая электронная микроскопия материалов – Москва: Изд-во «Наука», 1983. – 320с.
26. Lawn B.R., Evans A.G., and Marshall D.B. Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radial Crack System // J. Am. Ceram. Soc. 1980. V. 63, P. 574-581.
- 27 . Усеинов А., Кравчук К. Маслеников И. Индентирование. Измерение твердости и трещиностойкости покрытий // Наноиндустрия. 2013. № 7. С. 48-56
28. Anstis G. R., Chantikul P., Lawn, B. R. and Marshall D. B. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness – I. Direct crack measurements. // J. Am. Ceram. Soc. 1981. V. 64. P. 533–538.
- 29 . Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. // Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков. Эксперимент и численное моделирование // Вестник ТГУ. Математика и механика. – 2011. – Т. 16. – № 4. – С. 70-78.
- 30 . Стенд для исследования высокоскоростного соударения мелких частиц с преградой МПК F41F1/00: патент Рос. Федерация № 2610790; заявл. 23.10.2015; опубл. 15.02.2017, Бюл. №5.
31. Gerasimov A.V., Kalashnikov M.P., Sergeev V.P. et al. // Complex research on the interaction of glass with space debris // AIP Conference Proceedings. – 2015. – V. 1683. – P. 020055.
32. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования (дата введения: 01.01.1979).

33. ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования (дата введения: 01.01.1979).
- 34 . ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (дата введения: 01.03.2017).
35. ГОСТ 12.1.003-2014. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности (дата введения: 01.11.2015).
36. ГОСТ 12.1.029-80. ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация (дата введения: 01.07.1981).
37. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г.).
38. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 1 октября 1996 г.).
- 39 . ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (дата введения: 01.01.1989).
- 40 . ГН 2.2.5.3532-18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 13.02.2018 № 25).
- 41 . СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий (дата введения: 15.06.2003).
- 42 . СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\* (дата введения: 08.05.2017).
- 43 . ГОСТ 12.1.019-2017. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (дата введения: 01.01.2019).
- 44 . ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов (дата введения: 01.07.1983).

45 . СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (утв. 25.03.2009).

46 ГОСТ 12.4.011-89. ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация (дата введения: 01.07.1990).

47 . ПУЭ 1.1.13 Правила устройства электроустановок (6-е изд.) (с изменениями на 06.01.1999 г.)

48. Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"» от 10.07.2012 № 117-ФЗ.

49 .ВНЭ 5-79. Правила пожарной безопасности при эксплуатации предприятий химической промышленности (утв. Министерством химической промышленности 25 июля 1979 г.).

50 .ГН 2.1.6.3492-17. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений (утв. 22.12.2017, с изменениями на 31.05.2018).

51 . ГН 2.1.5.1315-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (утв. 30.04.2003, с изменениями на 13.07.2017).

52. ГОСТ Р 14.01-2005 Экологический менеджмент. Общие положения и объекты регулирования (Дата введения 01.01.2008г.)